

低炭素社会の実現に向けた
技術および経済・社会の定量的シナリオに基づく
イノベーション政策立案のための提案書

平成28年度 総合編

2050年の「明るく豊かな低炭素社会」
実現のための課題と展望

平成28年12月

“Challenges and Perspectives toward the Realization of
Dynamic and Affluent Low Carbon Society in 2050”

Summary Report 2016

Proposal Paper for Policy Making and Governmental Action
toward Low Carbon Societies

国立研究開発法人科学技術振興機構
低炭素社会戦略センター

LCS-FY2016-PP-00

巻頭言 低炭素社会実現のための課題と展望

○低炭素社会に向けた技術開発・社会制度の必要性

低炭素社会戦略センター（LCS）の目標は、「明るい豊かな低炭素社会」を実現する戦略をつくることである。現在ある技術、あるいは、それを合理的に発展させた技術で「家庭のエネルギー需要」は約 4 分の 1 に減らすことが可能であると考えている。今後、2050 年に向けて電気料金は多少変動するかもしれないが、エネルギーにかかるコストは減少する傾向にあると考えている。このことが個人にとっての「明るく豊かな低炭素社会」の具体的なイメージとなる。その際、適切な技術開発は併せて必要となる。技術開発には「低炭素社会のシナリオ」に沿った、あるいは、その少し先を見据えた「チャレンジングな技術開発」も含まれる。一方、そうした将来像に対するバックキャスティングとなる技術開発を進めると同時に、技術開発を後押しする社会制度もつくる必要性がある。

○日々の暮らしからの CO₂ 排出削減のポテンシャル

現在、日本のエネルギーは約 6 割が民生で消費されており、工場での消費は約 4 割になった。このことは、工場では今後もエネルギー効率は向上すると期待されるが、それ以上に民生部門に膨大な効率向上のポテンシャルがあることを意味している。このポテンシャルを顕在化させるには、技術革新と制度、社会の革新（法律、条例、認可のスピード等）が必要となる。それらがイノベーションを活性化し、ポテンシャルを顕在化するというシナリオとなる。

○エネルギー消費と経済成長のデカップリングの時代へ

ここ 10 年程、日本をはじめアメリカ等先進国のエネルギー消費は既に減り始めている。日本では、1973 年の第一次エネルギー危機を契機にエネルギー効率の改善がスタートした。それまでは GDP の伸びとエネルギーの伸びとは 1 対 1 であった。つまり日本の産業の中心は重化学工業で、GDP を倍にするためにはエネルギーも倍使うという時代が続いてきた。ここに省エネが始まった。エネルギー危機でエネルギー価格が 10 倍、20 倍と跳ね上がったことから、日本は国を挙げて省エネに取り組んできた。すなわち工業と省エネの時代である。このときの GDP は 200 兆円である。200 兆円から 330 兆円まで GDP を増やす間、日本はエネルギー消費を増やさなかった。日本は、エネルギーと経済のデカップリングを世界で初めて明確に実現した国なのである。

人工物は飽和してきており、今あるものを一旦壊してから新しく作る時代になった。GDP は増えていくが、エネルギーは減り始めていく時代となる。国連のデータによれば、日本のみならず世界の出生数はピークアウトした。今後もしばらく人口は増大するが、この人口の増大は寿命の延びによるものである。人口が飽和し、それに対して人工物も飽和し、エネルギー効率が向上して、エネルギー消費は減る。

○再生可能エネルギーの利用拡大に向けた社会

この場合、CO₂ を発生しないエネルギー源である再生可能エネルギーが考え方の基本となる。少し前までは再生可能エネルギーはコストが高と言われてきたが、今は既に十数円/kWh にまで安くなっている。LCS では、資源から最終製品までのプロセス・システムを設計した上で、太陽電池、風力発電、バイオマスなどのコスト評価を行っている。例えば、プロセスの途中の効率が上がれば、最終製品がいくらか安くなるかということを常に評価している。日本ではガスによる発電が最も多く、資源エネルギー庁によるコストは 13.7 円/kWh である。対して、現在の太陽電池と風力発電のコストは両者とも 16 円/kWh である。つまり、再生可能エネルギーは高

くて駄目だという時代は既に終わっている。地熱による発電コストは 12 円/kWh であるから、ガス発電より安い状況となっている。従って、我々は、2030 年までに再生可能エネルギーが最も安い時代がくると確信している。これらが、「明るい低炭素社会」を実現できる根拠となる。

COP21 に向けた 2015 年 11 月 10 日に IEA が 2040 年までの世界エネルギー見通しを発表した。世界における電力供給の構成は、2014 年は石炭火力発電の比率が最も高く、第 2 位は再生可能エネルギー、次にガス火力、原子力発電と続く。2040 年の予測では、今後は電力に対する投資の 60% は再生可能エネルギーになるというのが IEA の中間シナリオである。2040 年には再生可能エネルギーは、石炭火力を抜いて最大のエネルギー源になることを IEA も指摘している。

では、日本は今後どうすべきか。明るい低炭素社会のために、エネルギー効率を上げて、エネルギー消費を減らし、再生可能エネルギーを増やす。そうすることで、日本のように人口密度が高く、面積が狭い国でも、再生可能エネルギーでエネルギー自給国家がつかれるという世界のモデル、特にアジアのモデルになる。

○2050 年の我が国の「明るく豊かな低炭素社会」実現のための課題と展望

地球温暖化の防止は依然として人類共通の課題である。2015 年末の COP21(パリ)に先立ち、我が国は 2030 年に 26% の温室効果ガス排出削減目標とした約束草案を提出した。また、我が国の「地球温暖化対策計画」(2016 年 5 月 13 日閣議決定)にて、2050 年までに 80% の温室効果ガスの排出削減を目指すこととしている。COP21 でのパリ協定の採択、及び 2016 年 11 月の発効等を踏まえて、低炭素社会実現のための社会シナリオ・戦略の提案、将来に向けた低炭素社会像の選択肢の提示の重要性は一層高まっている。LCS は、明るい低炭素社会実現のための社会シナリオ研究を推進し、社会シナリオ・戦略の提案、2050 年までに我が国の温室効果ガス排出量の 80% 削減という目標に向けた 2030-2050 年の選択肢を提示するとともに、再生可能エネルギーと省エネルギーに対するビジョンの明確化、我が国における再生可能エネルギーが大量に導入された社会へのトランジション・マネジメント(移行期間のマネジメント)等の課題に取り組んでいく。

国立研究開発法人科学技術振興機構
低炭素社会戦略センター(LCS)
センター長 小宮山 宏

～低炭素社会戦略センターシンポジウム「低炭素社会実現のための課題と展望」
(平成 27 年 12 月 24 日(木)開催、伊藤謝恩ホール)基調講演～
をベースに事務局にて追記・編集

目 次

巻頭言

目次

エグゼクティブサマリー	1
Executive Summary	4
第 1 章 低炭素社会実現のための課題と展望	8
1.1 低炭素社会戦略センターの社会シナリオ研究・活動	8
1.2 次期 5 年間事業計画案の検討	9
1.3 次期 5 年間事業計画案を受けた社会シナリオ研究の推進	11
1.3.1 「定量的技術システム研究」と「定量的経済・社会システム研究」 の統合的な推進	11
1.3.2 低炭素社会システムの構築	12
1.4 これまでの主な成果	12
1.5 本文書の位置づけ	13
第 2 章 低炭素技術の進展・研究開発の方向性を提示する～「定量的技術システ ム研究」の視点から	15
2.1 定量的技術シナリオの構築と活用	16
2.1.1 対象とする技術・システム	16
2.1.2 定量的技術システム研究とその手法	16
2.1.3 コスト算出方法	17
2.2 太陽電池の定量的技術シナリオ及び燃料電池・蓄電池の新しい課題	18
2.2.1 太陽光発電システム	20
2.2.2 固体酸化物形燃料電池システム～将来の電源構成における SOFC の役割と技術開発課題	29
2.2.3 固体高分子形燃料電池用非白金触媒の特徴と課題	34
2.2.4 蓄電池システム	38
2.3 エネルギー供給源の多様化に向けた研究開発課題	42
2.3.1 中小水力発電－開発可能な発電電力量と発電原価、設備利用率との 関係－	42
2.3.2 地熱発電－高温岩体発電の発電コスト試算－	43
2.3.3 林業の活性化を通じた地域における低炭素社会の実現－林業素材 生産コストの機械化推進による低減効果－	45
2.3.4 バイオマス廃棄物のメタン発酵－反応解析によるプロセス合理化 の検討－	47
2.4 低炭素型エネルギーシステムに関連した重要技術の評価	49
2.4.1 CCS（二酸化炭素回収貯留）の概要と展望－CO ₂ 分離回収技術の評 価と課題－	50
2.4.2 将来的な水素の役割－低炭素排水素の経済性と CO ₂ 排出量－	50

2.5 低炭素社会実現に向けたデータ活用型材料研究（マテリアルズ・インフ オマディクス）	51
2.5.1 データ活用型材料研究	51
2.5.2 データ活用型研究のコンセプト拡張	52
2.5.3 今後の課題	54
2.6 定量的技術システム研究成果の活用・普及に向けて	55
2.6.1 ALCA ボトルネック課題検討に参画	55
2.6.2 日本学術会議と再生可能エネルギー導入の課題を抽出	56
2.6.3 NEDO-TSC 共催ワークショップを開催	57
2.6.4 再生可能エネルギー大量導入時の電力システムのあり方と水素の役割	58
2.6.5 燃料電池とその利用システムに関するイノベーションの可能性	59
2.7 定量的技術シナリオの今後の取り組み	60
 第 3 章 低炭素社会システムを社会実装に向けて展開する～「定量的経済・社会 システム研究」の視点から	62
3.1 低炭素技術の導入・普及促進に向けて	62
3.2 民生家庭部門の低炭素化の促進：電力使用量の見える化	63
3.2.1 家電の省エネポテンシャルの推計	63
3.2.2 省エネ行動促進のための節電アドバイス機能	64
3.2.3 実証実験の連携の必要性	65
3.3 民生部門の省エネへ向けた「電気代そのまま払い」	65
3.3.1 「電気代そのまま払い」実証実験の現状と課題	67
3.3.2 諸外国における初期投資ゼロの低炭素投資促進施策の現状	70
3.3.3 結言	72
3.4 ビジョン主導型の研究開発プログラム COI との連携	73
3.4.1 くらしからの省エネを進める政策デザイン研究国際ワークショッ プ～英国グリーンディール政策を参考に～	74
3.4.2 初期投資ゼロ金融による省エネ・再エネ事業推進枠組みの現状と課 題	75
3.4.3 初期投資ゼロの「電気代そのまま払い」実証実験と今後の展開・課 題	76
 第 4 章 低炭素社会システムの構築	78
4.1 低炭素社会実現のための統合モデルシミュレーション	78
4.1.1 エネルギー需要見通しから見る低炭素社会に向けた課題と展望	79
4.1.2 低炭素社会を定量的に描くために～現行技術による低炭素化のポ テンシャルと経済影響評価試算	83
4.2 電力系統・安定化関連	88
4.2.1 再生可能エネルギー大量連系時における需給制御システムの提案	88
4.2.2 既存電源および電気自動車の活用を考慮した周波数調整市場の設 計とその経済性評価	91
4.2.3 九州地域における太陽光発電大量導入と過渡安定度を考慮した電 力システムの新しい経済的負荷配分制御の研究	95
4.2.4 燃料電池設置型一括受電集合住宅において電力融通を行う際の経 済性の評価	98

4.2.5	パリ協定を踏まえた再生可能エネルギー大量導入と電力システム のイノベーション	100
4.3	太陽光発電に関する導入量推計と出力抑制が与える事業性評価	101
4.3.1	技術発展を考慮した地域別の太陽光発電導入量推計	101
4.3.2	太陽光発電における出力抑制が与える事業影響評価	102
4.4	気候変動緩和の世界的な取り組みへの日本の貢献	105
4.4.1	途上国における技術による CO ₂ 削減ポテンシャルの評価	107
4.4.2	技術製造・普及時の経済的効果に関するバリューチェーン評価	109
4.4.3	低炭素社会戦略センターの考える将来の国際・国内温暖化対策スキ ーム	110
第 5 章	今後の課題～2050 年の「明るく豊かな低炭素社会」に至る道筋	112

エグゼクティブサマリー

地球温暖化の防止は人類共通の課題である。平成 28 年 5 月、我が国は「2050 年までに 80%の温室効果ガスの排出削減」を盛り込んだ、地球温暖化対策計画を閣議決定した。これは、前年末の COP21 で採択されたパリ協定を踏まえた内容となっている。世界と日本が温暖化対策に少しずつ前進していることは確実であるが、一方、その将来の低炭素社会の姿はいまだ見えていない。

低炭素社会戦略センター（以下、LCS）は、我が国の経済・社会の持続的発展を伴う、科学技術を基盤とした「明るく豊かな低炭素社会」の実現のため、2030-2050 年の望ましい社会の姿を描き、その実現に至る道筋の選択肢を定量的に示す。つまり、未来のあるべき姿から定量的バックキャストの手法を用いて、将来に向けた、技術システム、経済・社会システムの設計と、研究開発課題の明確化を行う。「明るく豊かな低炭素社会」に向けて今後我が国はどうすべきか、その方法論を定量的に示していく。

具体的には、

- ・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
- ・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

の研究を進め、将来必要となる技術がどう社会に広がるか、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を描くための研究・活動を実施している。

本文書は、これまで LCS が取り組んできた「低炭素社会の実現に向けた技術および経済・社会の定量的シナリオに基づくイノベーション政策立案のための提案書」（以下、LCS 提案書）等、研究の成果をとりまとめた「平成 28 年度における総合編」として、「平成 25 年度総合編『明るく豊かな低炭素社会』の実現を目指して」（平成 26 年 6 月）（以下、「社会シナリオ第 2 版」）以降に提案された各 LCS 提案書の中から、主な研究成果を概説するものである。すなわち、各提案書のポイントや最新の研究成果を取りまとめ、LCS が実施する社会シナリオ研究の概要及び進捗状況を示すものである。以下に、本文書の概要を記す。

巻頭言及び第 1 章では、LCS における低炭素社会実現のための課題と展望として、社会シナリオ研究・活動の進め方の枠組みとともに、LCS が 2050 年までに我が国の温室効果ガス排出量の 80%削減という目標に向けた 2030-2050 年の選択肢の提示、再生可能エネルギーと省エネルギーに対するビジョンの明確化、我が国における再生可能エネルギーが大量に導入された社会へのトランジション・マネジメント（移行期間のマネジメント）等の課題に取り組んでいくこと、バックキャストिंगに基づく「低炭素社会のシナリオ」に沿った、あるいは、その少し先を見据えた「チャレンジングな技術開発」の必要性、技術開発を後押しする社会制度をつくる必要性について示した。

第 2 章では、LCS が重点的に取り組んできた「定量的技術システム研究」の視点から、低炭素技術の進展・研究開発の方向性を提示する。2050 年に 80%削減に向けて、早期の低炭素技術開発・普及のための戦略的なエネルギー技術開発の加速が不可欠である。そのためにも、低炭素エネルギーシステムに寄与する多様な技術を多角的に評価し、求められる重要技術開発項目と目標達成時期を明らかにすることが必要となる。ここでは、以下の技術について、設計・評価、コストの将来見通しを

紹介する。

- ・これまで取り組んできた太陽電池・燃料電池・蓄電池の最新の課題
- ・エネルギー供給源の多様化の観点から再生可能エネルギーとして期待されている、中小水力発電、地熱発電、バイオマス
- ・重要なエネルギーシステムとしての CCS（二酸化炭素回収貯留）及び低炭素排水素

また、技術進展や低コスト化の障壁となる技術課題と、課題解決に向けた研究開発の方向性について紹介する。更に、社会課題の把握・分析から、それらの因子を分解して、要素技術課題までに落としこむ検討、いわゆるバックキャストिंगの観点から見たときに、最近急速に注目を集めているマテリアルズ・インフォマティクス（低炭素社会実現に向けたデータ活用型材料研究）として知られる研究領域の重要な位置づけについて紹介する。本章の結びとして、定量的技術システム研究の今後の取り組むべき課題、関係機関に向けた発信の事例について紹介する。

第 3 章では、「定量的経済・社会システム研究」の視点から「低炭素技術の導入と普及の促進」「低炭素社会システムを社会実装に向けて展開」する最新の取り組みについて提示した。「定量的経済・社会システム研究」では、個別エネルギー技術、システムの導入による社会の経済・環境改善の効果の見通しを評価した。また、低炭素技術の導入・普及促進のための経済・社会制度を分析評価し、低炭素社会システムの実証、事業化、実社会への普及につなげる取り組みを行った。

- ①「生活の質を落とさずに家庭部門の低炭素化を実現する」ために、社会実証実験を通して各種低炭素化策の普及促進に向けた検討等を行う研究体制を構築した。関東及び近畿地方の 23 地方自治体の協力のもと、約 230 世帯の参画を得て平成 25 年度から実施している社会実証実験「家庭の電力使用量見える化実験」の研究結果について述べる。具体的には、家庭の電力消費量に関する精細なデータ分析に基づいて推計した家電の買い替えや省エネ行動による節電ポテンシャル、継続的な省エネ行動を促すために社会心理学の要素を取り入れて構築した節電アドバイスシステムについて紹介する。
- ②低炭素技術やシステムの社会への導入・普及を促進する経済・社会制度の枠組みとしてグリーンパワーモデレータを中心とする「電気代そのまま払い」を提案した。LCS による推計では、冷蔵庫を全て最新のものに買い替えることで、家庭の電力消費の約 25～40%が削減可能である。電気代が節約になった額を月々電気代に上乗せて返済することで、家計の日々の出費は変わらずに、冷蔵庫が新しくなり、電力消費や CO₂ 排出量も減少する枠組みについて概要を述べ、実施状況について紹介する。また、諸外国の事例についても概説する。
- ③10 年後の目指すべき社会像を見据えたビジョン主導型の研究開発プログラムであるセンター・オブ・イノベーション（COI）プログラムの「共進化社会システム創成拠点」（九州大学）との連携体制を深化、東京大学 EMS サテライトとのワークショップを企画・開催した。平成 28 年 4 月からの家庭用小売電気の全面自由化の中、多様なエネルギー供給源に対応し、地域特性が活かされた、安定的な需給を実現する電力・エネルギーシステムを提示する必要性が生じている。これまで、「くらしからの省エネを進める政策デザイン研究国際ワークショップ」「再生可能エネルギー大量導入時の電力システムのあり方と水素の役割」「パリ協定を踏まえた再生可能エネルギー大量導入と電力システムのイノベーション」等、計 6 回の

ワークショップを実施、政府関係機関・研究機関・エネルギー関連企業等から多くの参加者を得ている。

第 4 章では、「低炭素社会システムを構築」するにあたり、定量的技術システム研究と定量的経済・社会システム研究で得られた知見を統合し、個別技術を組み込み、全体を統合した電力システム、エネルギーシステムの評価を進め、エネルギーシステム全体を革新するための制度設計と技術革新への提言をまとめ、関係機関、事業者、自治体などと連携して、イノベーションを喚起する先駆的な社会実装を進めていく。「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、定量的技術システム研究と定量的経済・社会システム研究の成果を組み合わせ、「明るく豊かな低炭素社会」の姿を描き出すことを目的とする。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、低炭素技術や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した。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た。併せて、世界的な気候変動緩和の取り組みに日本が貢献を果たすため、日本の力を結集した低炭素技術の円滑な海外移転の進め方について提案を行った。

第 5 章では、2050 年の「明るく豊かな低炭素社会」に向けた道筋を検討した。将来社会では、現在とはエネルギーシステムに抜本的变化があり、産業構造や技術が変わるであろうと想定され、それがイノベーションにつながっていく。技術システム研究による成果と経済・社会システム研究による成果を統合し、シナリオを関連付け、精緻な社会システムを描き提案する必要がある。特に、新しい技術水準を反映し階層構造を進化させる LCS 独自の要素技術分野の研究に加え、再生可能エネルギーが主流となる将来の電力システムの検討が重要である。様々な要因に関して緻密・かつ包括的な検討を重ねることで、日本が強みを持つ革新的技術分野でどのように日本特有の問題に対応しながら、広く技術を普及させ、効果をあげられるのか、科学技術の開発課題は何か、日本が技術のハード、ソフト分野でリーダーシップをとるためにどうすればよいか、社会がどう変わっていくのかを示し、研究課題を明らかにする。そして、技術と経済・社会は、これからも変動するであろう。それに先立つシナリオを作成し、提案していくことが今後の使命になる。LCS は、これら社会シナリオ研究の成果を本「社会シナリオ第 3 版」や個別テーマごとの「LCS 提案書」等の形で、国、大学、企業、地方自治体等の関係機関及び広く一般に向けて発信するとともに、JST 内外の制度や他機関との連携を通じて、幅広い活用を促すことで、これからの低炭素社会の実現に貢献していく。

Executive Summary

Global warming is a threat that must be tackled as a common problem for all humanity. In May 2016, the Cabinet of Japan approved “The Plan for Global Warming Countermeasures,” which aims for an 80 % reduction in greenhouse gas emissions by 2050. This Plan is based on the Paris Agreement adopted at COP21, 2015. Although nations worldwide have been making steady progress in the fight against global warming, we are still far from making the transition into a low carbon society.

The Center for Low Carbon Society Strategy (LCS) promotes the application of science and technology toward the goal of realizing an affluent low carbon society that will also be conducive to economic and social development, in sustainable ways. LCS is developing a number of quantitative scenarios for the period 2030 to 2050 to achieve this transition. These scenarios are based on the results of quantitative backcasting that have enabled us to identify the technology, economic and social systems needed to make the desired transition and to clarify the issues that need to be resolved through further R&D. LCS proposes methodologies to work toward an affluent low carbon society in Japan.

Our research consists of these two categories:

- Quantitative technology scenario research for low carbon technologies contributing to the transition toward a low carbon society, and
- Quantitative economic and social scenario research for achieving a sustainable low carbon society that is conducive to economic development.

We outline social systems for a low carbon society conducive to economic development. In that process, in addition to demonstrating applications for low carbon technologies, we have taken into consideration the multiple issues facing Japan, including the aging of its population and the challenges involved in the ongoing recovery and reconstruction from the 2011 Great East Japan Earthquake.

This report is a summary of our latest research developments in the period 2014 to 2016 and research proposals such as the “Proposal Paper for Policy Making and Governmental Action toward Low Carbon Societies” that we have presented since the publication of our previous summary report in 2014 “Toward the Realization of Dynamic and Affluent Low Carbon Society (Social Scenario 2).” This report summarizes these LCS proposal papers and provides an overview and update of our research on social scenarios.

The Preface and Chapter 1 “Challenges and Perspectives toward the Realization of a Dynamic and Affluent Low Carbon Society” present a framework for promoting research and development of social scenarios, and a roadmap for 2030 to 2050 to allow Japan to achieve its goal of an 80% reduction in greenhouse gas emissions by 2050. It also introduces the importance of promoting renewable energy and energy saving and how to manage the transition to a society that relies primarily on renewable energy. We explain the importance of developing technologies innovatively for these scenarios based on backcasting, and also for even greater goals beyond 2050. We emphasize the importance of creating a social system that will support such technological development in order to make this transition.

Chapter 2 looks at the progress and research trends in low carbon technologies from the

perspective of our main focus, Quantitative Technology Systems Research. In order to achieve an 80% reduction in greenhouse gas emissions by 2050, we need to develop and promote low carbon technologies at an early stage, so it is important to accelerate the strategic development of energy technologies. This calls for a multilateral evaluation of the various technologies that contribute toward a low carbon energy system. We must also identify the R&D agenda and target periods for critical technologies. In this chapter, we discuss the design, evaluation, and prospective costs for the following items:

The latest issues regarding solar cells, fuel cells and batteries, which we have been targeting; renewable energies such as small/medium-scale hydroelectric generation, geothermal power, and biomass as a means of diversifying energy sources; and CCS (carbon capture and storage systems) and hydrogen produced from low carbon energy sources, as components of key energy systems.

This has allowed us to identify issues standing in the way of technological development and cost reductions, and to propose actions to resolve these issues. We also look at the significance of material informatics (materials research with data-utilization toward implementation of low-carbon society), an area of research which has recently become important for backcasting – the assessing and analyzing of social issues to identify the necessary component technologies. We conclude this chapter with a look at issues that need to be considered in developing quantitative technology systems, and case studies we have presented with affiliated organizations.

Chapter 3 examines the latest developments in introducing and promoting low carbon technologies and implementing low carbon social systems from the perspective of research on quantitative economic and social systems. Here, we evaluate the effects of introducing individual energy technologies and systems on improving the economic and environmental conditions of society. We also analyze and evaluate the economic and social systems necessary for the introduction and promotion of low carbon technologies to pave the way for the demonstration, commercialization and implementation toward low carbon societies.

1. In order to achieve low carbon improvements in the household sector without lowering the quality of life, we established a research structure for promoting the spread of various low carbon strategies through social experimentation. Since 2013, in cooperation with 23 local municipalities in the Kanto and Kinki regions, we have been conducting a social experiment called “visualization of real-time electricity consumption in household” involving around 230 households. Based on precise analysis of data from this experiment, we estimated the potential savings achieved by replacing electrical appliances with energy-efficient models and by energy-efficient behavioral changes. Drawing on insights from social psychology, we produced an energy-saving advice system to promote continuous energy-saving behavior. The system is introduced in this chapter, along with the results of our experiment and research.
2. As a framework for introducing and promoting low carbon technologies and systems throughout society, we propose a Pay-as-You-Save scheme to allow households to install energy efficient technology with no up-front costs through a new-type entity we call a “green power moderator.” We estimate that household electricity consumption could be reduced by 25-40% just by replacing refrigerators with the latest models. Households could replace their refrigerators and reduce electricity consumption and CO₂ emissions

with no change in household expenses. The savings on their electricity bill would be used to pay for their new fridges in monthly installments. We explain how the scheme works, with case studies from other countries.

3. As part of the Center of Innovation (COI) Program to envision society 10 years from now, we have deepened our collaboration with the Center for Co-Evolutional Social Systems (CESS) at Kyushu University. We organized a workshop on this with the University of Tokyo's EMS Satellite of CESS. April 2016 saw the start of full-scale deregulation of the household and small business electricity market in Japan. In order to achieve stable electric power supply and demand, we need to propose electricity and energy systems that take into consideration the diversity of energy sources and regional characteristics. To date, LCS has conducted six workshops, attracting many participants from government agencies, research institutions and energy-related companies. Typical themes have been the "International Research Workshop on Policy Design to Induce Energy Efficiency Improvements within the Household Sector;" "Power Systems and Role of Hydrogen in Renewable Energy Massive Introduction;" and "Massive Introduction of Renewable Energy and Innovations in Power Systems after the Paris Agreement."

Chapter 4 focuses on how to construct a low carbon social system. Combining our knowledge from research on quantitative technology systems and economic and social systems, we evaluate integrated power systems and energy systems using various technologies. We then summarize our recommendations for achieving innovation in energy system design and technology. LCS is committed to continued collaboration with affiliated agencies, companies and local governments to stimulate innovation aimed at realizing a better society. In developing our Integrated Simulation Model of a Low Carbon Society, we combined results from our research on quantitative technology and quantitative economic and social systems to describe an affluent low carbon society. When introducing low carbon technologies and policies, it is essential to evaluate and verify the positive effects of such actions in boosting prosperity from both a social and economic perspective. LCS has created an integrated simulation model based on a combination of the applied general equilibrium model, the multi-regional power planning model, and the final energy demand model for households to examine how the application of low carbon technologies and policies across society will affect energy supply-demand, total CO₂ emissions, and the national economy. Any further issues arising from this process we feed back to improve the quantitative technology scenarios. Continued repetition of this feedback process helps us present a more concrete and realistic vision of a low carbon society. Also included is our proposal on how to better promote the transfer of Japan's strengths in low carbon technologies in order to contribute toward the mitigation of global climate change.

Chapter 5 discusses the paths toward realizing an affluent low carbon society in 2050. Fundamental changes can be expected in energy systems, bringing about changes in industrial structures and technologies, which in turn will lead to innovation. We need to propose detailed scenarios describing social systems that come from adapting mutual feedback between quantitative technology system research and quantitative economic and social system research. In addition to promoting our own research into the component

technologies needed to allow the evolution of hierarchical structures reflecting new technological levels, it is imperative that we study future power systems that will be mainly based on renewable energies. Based on detailed and comprehensive analysis of multiple factors, we present proposals on how to make the most of Japan's strengths in innovative technologies to both tackle problems unique to Japan and at the same time to disseminate these technologies effectively throughout the world. What are the scientific and technological challenges? How can Japan gain technology leadership in the both fields of hardware and software? We identify the target issues for research and describe the changes that will take place in society. Technologies will undoubtedly change, as will economies and societies. Our mission is to develop scenarios that will pave the way for such changes. The results of our research on social scenarios have been compiled into our report, "Social Scenario 3," and into individual theme-based LCS proposal papers. These will be actively shared with affiliated government agencies, universities, companies and local autonomies as well as the public. In addition to disseminating these results, we intend to further our collaboration with the other JST programs and other affiliated organizations to promote the widespread application of our research with the goal of contributing toward the realization of a low carbon society.

第 1 章 低炭素社会実現のための課題と展望

1.1 低炭素社会戦略センターの社会シナリオ研究・活動

地球温暖化の防止は人類共通の課題である。平成 28 年 5 月、我が国は「2050 年までに 80% の温室効果ガスの排出削減」を盛り込んだ、地球温暖化対策計画を閣議決定した。これは、前年末の COP21 で採択されたパリ協定を踏まえた内容となっている。世界と日本が温暖化対策に少しずつ前進していることは事実であるが、一方、その将来の低炭素社会の姿はいまだ見えていない。

科学技術振興機構（以下、JST）では、文部科学省が策定した「低炭素社会づくり研究開発戦略」に基づき、平成 21 年 12 月に低炭素社会戦略センター（以下、LCS）を設置、平成 22 年度より「低炭素社会実現のための社会シナリオ研究」事業（以下、「本事業」という）を開始した。LCS の目指す「明るく豊かな低炭素社会」とは、「地球温暖化の緩和に向けた取り組みによって、二酸化炭素（CO₂）を中心とした温室効果ガス（GHG）排出量が削減」し、「安全・安心な生活が維持」でき、「エネルギーが安定的に確保」され、「経済が拡大して生活の豊かさが増し、若者に将来への展望が開け、高齢者が生きがいを持って暮らすことができる活力ある社会」である。

LCS は、我が国の経済・社会の持続的発展を伴う、科学技術を基盤とした「明るく豊かな低炭素社会」の実現のため、2030-2050 年の望ましい社会の姿を描き、その実現に至る道筋の選択肢を定量的に示す。つまり、未来のあるべき姿から定量的バックキャストの手法を用いて、将来に向けた、技術システム、経済・社会システムの設計と、研究開発課題の明確化を行う。「明るく豊かな低炭素社会」に向けて今後我が国はどうすべきか、その方法論を定量的に示していく。

LCS の社会シナリオ研究は、人文・社会科学と自然科学の研究者が参画する研究体制のもと、最先端の科学技術・研究開発の知見・データ等を取り入れながら、低炭素技術の開発目標と研究課題を定量的に提示する「定量的技術シナリオ」と、低炭素技術の導入・普及促進の経済・社会制度を定量的に提示する「定量的経済・社会シナリオ」を統合させることにより、低炭素技術の導入・普及による社会の低炭素化及び経済活性化の見通しを定量的に示すことができる。更に、低炭素技術が実社会・実生活につながる方策を設計・評価する「低炭素社会システム構築」により、「明るく豊かな低炭素社会」像の選択肢を広範囲に示すとともに、その実現に至る具体性のある道筋を示すことができる。

社会シナリオ研究には、IPCC（Intergovernmental Panel on Climate Change）レポート、IIASA（International Institute for Applied Systems Analysis）の GEA（Global Energy Assessment）、IEA（International Energy Agency）の“World Energy Outlook”、環境省・環境研究総合推進費の終了報告書等、マクロで包括的なものがある。LCS の社会シナリオ研究では、地域・社会への総合的な実装に着目して、低炭素技術をコストも含めて深掘りして積み上げたものであり、文献からの引用ではない。地域・社会への実装としてまとめることにより、従来の「技術シナリオ」と「経済・社会シナリオ」のギャップを埋めている。

LCS は、我が国の経済・社会の持続的発展を伴う科学技術を基盤とした「明るく豊かな低炭素社会」の実現に貢献するため、2030-2050 年の望ましい社会の姿を描き、その実現に至る道筋を示す社会シナリオ研究を推進し、社会シナリオ・戦略の提案を行っている。社会シナリオ研究・活動の推進を通じて、第 5 期科学技術基本計画等の科学技術政策、及び地球温暖化対策計画、環境エネルギー技術革新計画

(2013)、エネルギー・環境イノベーション戦略（NESTI2050）等の地球温暖化対策に、積極的に貢献したいと考えている。

なお、LCS が描く将来像は一つの姿に限定されるものではない。社会シナリオを描く場合には多くの要素が絡み合うが、どのような仮定がどう将来像に影響するのかを示すことも重要である。その中の道筋を設定して検討することになる。また、低炭素社会実現のための社会シナリオには、本文書では取り上げていないものの、温暖化そのもののサイエンスや、影響及び適応策なども関連があり重要な要素として含まれる。低炭素化方策の中では、BEMS や HEMS 等、建物の省エネや地域単位での省エネ効果も、民生部門での削減が重要であり、今後の検討課題である。

1.2 次期 5 年間事業計画案の検討

東日本大震災をきっかけに日本のエネルギー情勢が大きく変化したこと、京都議定書の第一約束期間が終了したこと、米国を中心に気候変動に対する世界の情勢が変化していること等に鑑み、今日の日本及び世界が抱える課題を俯瞰し、それら課題の中から LCS が自らの強みを活かして取り組むべき我が国の低炭素化に向けた具体的課題を明確にするため、LCS は、事業開始 5 年度目を迎えた 26 年度後半を中心に、JST メンバー、LCS メンバー、外部有識者による「次期 5 年間事業計画検討会」を設置した。LCS は検討会の意見を適宜反映して「次期 5 年間事業計画案」を取りまとめた¹⁾。

「次期 5 年間事業計画案」では、事業全体として低炭素技術が実社会・実生活につながる方策を設計・評価する「低炭素社会システム構築」を更に進め、社会に実装される社会シナリオ・戦略を提案することを基本理念とし、それを達成するためのプロセスと具体的な計画を示した。

平成 27 年度からの事業推進では、「次期 5 年間事業計画案」を反映し、各々の取り組みを社会実証・社会実装につながるよう、「定量的技術システム研究」と「定量的経済・社会システム研究」を相互にフィードバックを図りながら統合的に推進している。「低炭素社会システム構築」では、新しい方法論の検討・実証を行い、社会実装に向けて低炭素社会システムを展開し、2030 年の低炭素社会へ向かう道筋・2050 年の低炭素社会像の選択肢を提示している。

¹⁾ <http://www.jst.go.jp/lcs/info/2015/06/post-38.html> 参照 (LCS 次期 5 年間事業計画案(2015 年 6 月 8 日公開))。

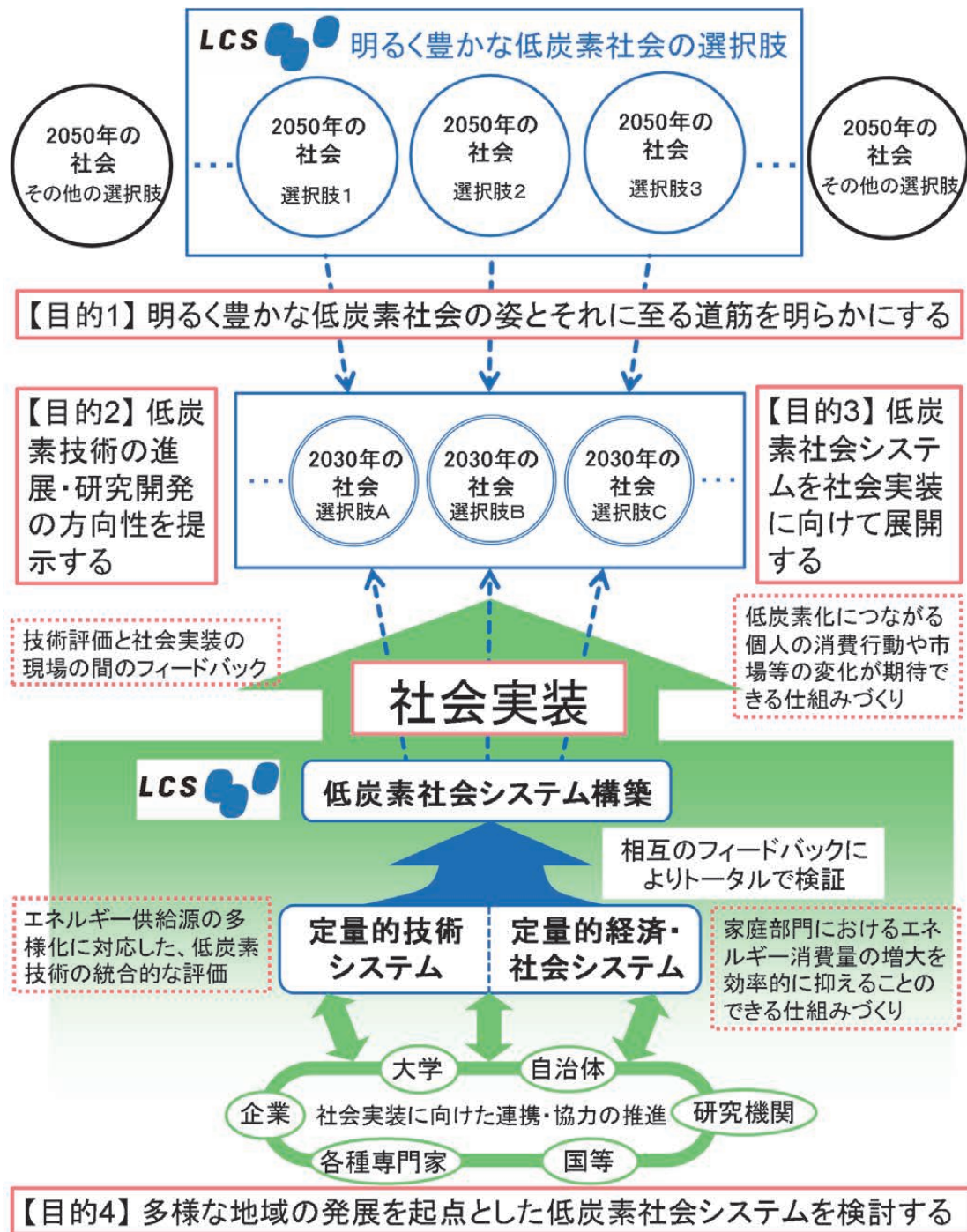


図 1-1 次期 5 年間事業計画案の目的（イメージ）
<http://www.jst.go.jp/lcs/info/2015/06/post-38.html> 参照
 （LCS 次期 5 年間事業計画案(2015 年 6 月 8 日公開)）

1.3 次期 5 年間事業計画案を受けた社会シナリオ研究の推進

社会シナリオ研究の推進にあたっては、低炭素技術の導入・普及による社会の低炭素化及び経済活性化の見通しを定量的に示すことが必要である。低炭素社会が進んで、かつ経済も活発化していくシナリオを提示する。シナリオの重要な点は、どのような技術が必要となるか、どのような産業構造の変化が起きるかを、幅を持って示すことである。

以下に、最先端の科学技術・研究開発の知見・データ等を取り入れながら、低炭素技術の開発目標と研究課題を定量的に提示する「定量的技術システム研究」と、低炭素技術の導入・普及促進の経済・社会制度を定量的に提示する「定量的経済・社会システム研究」の統合的な推進と、低炭素技術が実社会・実生活につながる方策を設計・評価する「低炭素社会システム構築」について説明する。

1.3.1 「定量的技術システム研究」と「定量的経済・社会システム研究」の統合的な推進

①「定量的技術システム研究」

第 2 章において、【目的 2】「低炭素技術の進展・研究開発の方向性を提示する」視点から概説する（図 1-1 参照）。「定量的技術システム研究」では、社会の低炭素化を導く技術（低炭素技術）を対象として、その性能及びコストの将来見通しを経時的かつ定量的に示すとともに、技術進展を図るため、今後取り組むべき研究開発目標を提示する。具体的には、低炭素技術を原理から製品製造プロセスまでを階層的に構造化して定量的に分析を行い、最新の研究開発動向も含めて低炭素技術の性能・経済性・環境性の経時発展を見通し、将来の低炭素技術の性能向上と低コスト化を達成するために今後取り組むべき研究開発の目標と技術課題を提示する。

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。LCS は定量的技術システム研究の推進にあたり、エネルギー供給側（再生可能エネルギーの利用、発電効率の向上等）と需要側（省エネ・節電、リサイクルの活用等）の双方の技術に着目し、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（「低炭素社会づくりのための総合戦略とシナリオ」（平成 24 年 7 月）（以下、「社会シナリオ第 1 版」）他）。

重要度の高い低炭素技術として太陽電池、燃料電池、蓄電池から研究をスタートし、平成 24 年度以降は、それらに加え、バイオマス、風力発電、中小水力発電、地熱発電、二酸化炭素貯留（CCS）、水素の役割等の低炭素技術・構成技術について調査・分析を行うとともに、電力等エネルギーシステムの一環として評価を行い、2030 年のコスト構造・CO₂ 排出量等を解析、低炭素技術の開発目標と研究課題を定量的に提示している。併せて、「既存の低炭素技術」だけでなく「将来の新しい低炭素技術」に対してもその設計と評価を迅速に実施することが可能となる「低炭素技術設計・評価プラットフォーム」の構築に取り組んでいる。

②「定量的経済・社会システム研究」

第 3 章において、【目的 3】「低炭素社会システムを社会実装に向けて展開する」視点から概説する（図 1-1 参照）。「定量的経済・社会システム研究」では、これら低炭素技術を社会に導入した際の経済・環境への効果を算定する。更に、低炭素技術の導入や省エネ行動等による経済効果・暮らしへの影響を見通し、社会の低炭素化と豊かな暮らしを両立させる経済・社会制度を提示する。具体的には、自治体と

の共同研究「家庭の電力使用量見える化」社会実験、停電予防連絡ネットワークのシミュレート、「電気代そのまま払いと、それを支える事業者グリーンパワーモデレータ」等の社会実証・社会実験を行い、社会シナリオの充実につながる定量的経済・社会システム研究を推進している。更に、地球規模で進む環境変化・国際化・人口問題等に対応できる持続可能な共進化社会システムの創成へ向けて「新たな都市 OS の社会実装」を目指す九州大学 COI「共進化社会システム創成拠点」と連携、東京大学 EMS サテライトと共催にてワークショップを企画・開催し、社会シナリオ研究の成果を活用するとともに、LCS 研究員等が議論に参加する等、エネルギー供給源の多様化に対応した低炭素技術の統合的な評価や、低炭素化につながる個人の消費行動・市場の変化の検討を行っている。

1.3.2 低炭素社会システムの構築

低炭素技術の研究開発と導入・普及が進むことによる社会の低炭素化と経済の拡大を見通し、低炭素社会の実現に向けた社会シナリオを提示する。

応用一般均衡モデルにより経済の持続的発展と社会の低炭素化の両立を定量的に算定、発展途上国を含む世界各国の省エネルギーを通じたエネルギーコストの削減の調査・分析、各国における温室効果ガス排出削減の施策の調査・分析等を行い、その結果が我が国の低炭素社会構築に反映できる国際戦略研究を推進している。

低炭素社会システムの構築には、【目的 4】「多様な地域の発展を起点とした低炭素社会システムを検討する」ことが重要なポイントとなる（図 1-1 参照）。地域の低炭素化に向けた取り組みが、低炭素技術導入の短期の誘導策に頼らずに経済的に自立したものに発展し、それら取り組みの経済性の高さをもって国全体として大きな力を発揮できるよう、市民のより良い暮らしと地域の低炭素化が同時に実現される仕組みを設計する。自治体等と連携・協力して低炭素技術が実社会・実生活に導入・普及する方策を検討するなかで、普遍的要素を見出すこと等により、他地域にも展開できる経済性の高い方策に発展させていく。

1.4 これまでの主な成果

平成 22-23 年度の社会シナリオ研究の成果については、「社会シナリオ第 1 版」としてとりまとめ、低炭素技術の製造プロセスにおける要素技術とコスト構造の定量的な評価を通じた今後の研究開発の方向性・具体的技術発展性を示した定量的技術シナリオ、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・社会シナリオを提示して、「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示した。

平成 24 年度以降も、社会環境の変化も踏まえ LCS として今後取り組むべき課題を議論した「次期 5 年間事業計画案」の検討に加え、①内閣府総合科学技術・イノベーション会議（CSTI）事務局の要請を受けたエネルギー戦略協議会等での政策立案者への成果発信、②日本学術会議と企画した国際シンポジウムでの我が国の再生可能エネルギー導入に関する課題抽出、③NEDO-技術戦略研究センター（TSC）や COI と連携したワークショップの企画・開催、④「2030 年の国民生活への経済影響」を所得階層別に試算、⑤「停電予防連絡ネットワーク」の構築、⑥CIS 系薄膜太陽電池企業の宮城県への参加に貢献等、JST 内、国・自治体・関係機関と連携した社会シナリオ研究の成果活用がなされ、JST として「研究開発成果の最大化」に向けた取り組みを行っている。

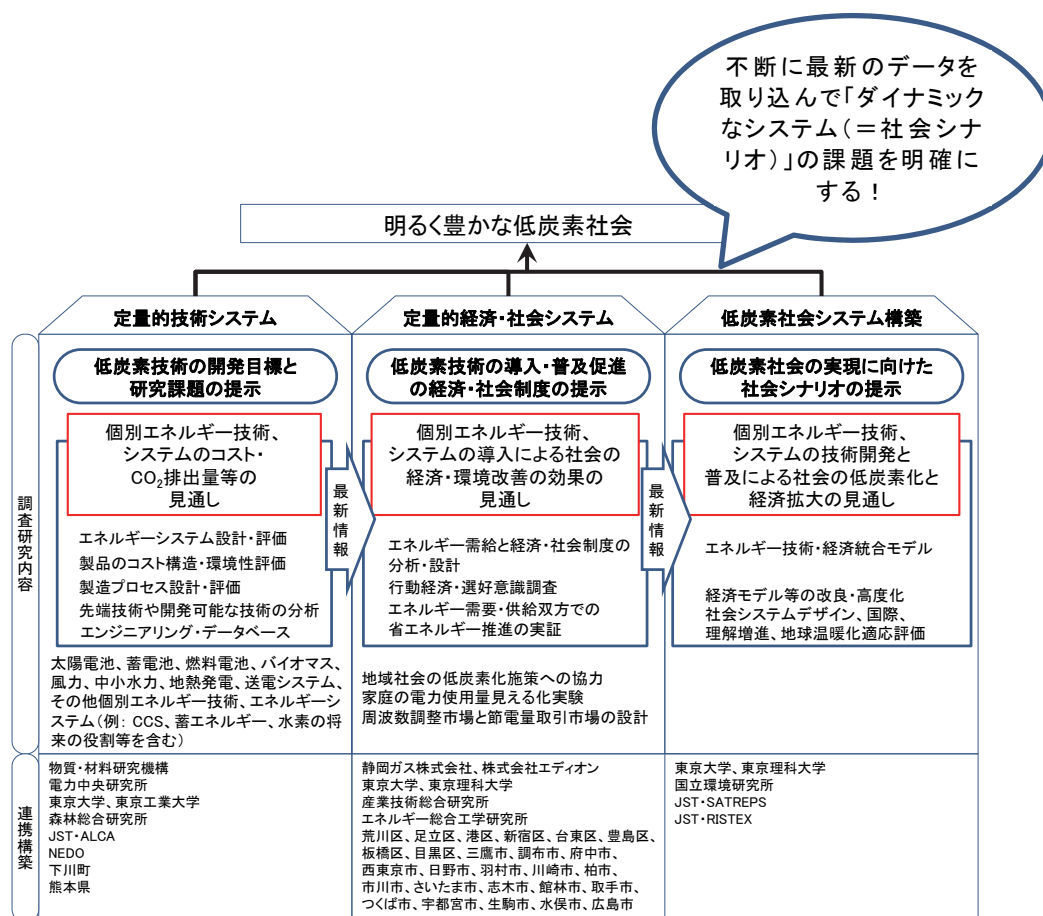


図 1-2 低炭素社会戦略センターが実施する研究・調査の概要

平成 25 年度からは、社会シナリオ研究の全体像を示した「平成 25 年度総合編『明るく豊かな低炭素社会』の実現を目指して」（平成 26 年 6 月）（以下、「社会シナリオ第 2 版」）を提案、HP で公表するとともに、個別テーマについて、これまでの研究・調査から見えてきた低炭素社会構築のための重要事項、新たな知見を盛り込んだ改訂や新規テーマに取り組み、技術開発編（25 冊）、社会システム編（8 冊）等、計 43 冊の「低炭素社会の実現に向けた技術および経済・社会の定量的シナリオに基づくイノベーション政策立案のための提案書」（以下、LCS 提案書）を発行・公表して、社会シナリオ・戦略の JST の業務への活用、国・大学・企業・地方自治体等の関係機関及び国民の幅広い活用を促進した。

1.5 本文書の位置づけ

本文書は、これまで LCS が取り組んできた LCS 提案書等、研究の成果をとりまとめた「平成 28 年度における総合編」として、「社会シナリオ第 2 版」以降に提案された各 LCS 提案書の中から、主な研究成果を概説するものである。すなわち、各提案書のポイントや最新の研究成果を取りまとめ、LCS が実施する社会シナリオ研究の概要及び進捗状況を示すものである。

「次期 5 年間事業計画案」の関係性に基づき、「低炭素技術の進展・研究開発の方向性の提示～定量的技術システム研究」（第 2 章）、及び「低炭素社会システムの社

社会実装に向けた展開～定量的経済・社会システム研究」(第3章)を相互にフィードバックを図りながら統合的に推進し、低炭素社会システムを構築する(第4章)。定量的技術システム研究により、低炭素技術の統合的な評価を経て重要技術開発項目が示される。定量的経済・社会システム研究により、これらの技術開発を考慮した新しい技術が社会に受容されるために必要な支援制度が明らかになる。

更に、社会実装を通じた市場の評価により、「技術評価と社会実装の現場の間のフィードバック」のループと、「個人の消費行動や市場等の変化」によるループを回して、この時間的プロセスをダイナミックに評価していくことが LCS の使命のひとつである(図 1-3 参照)。

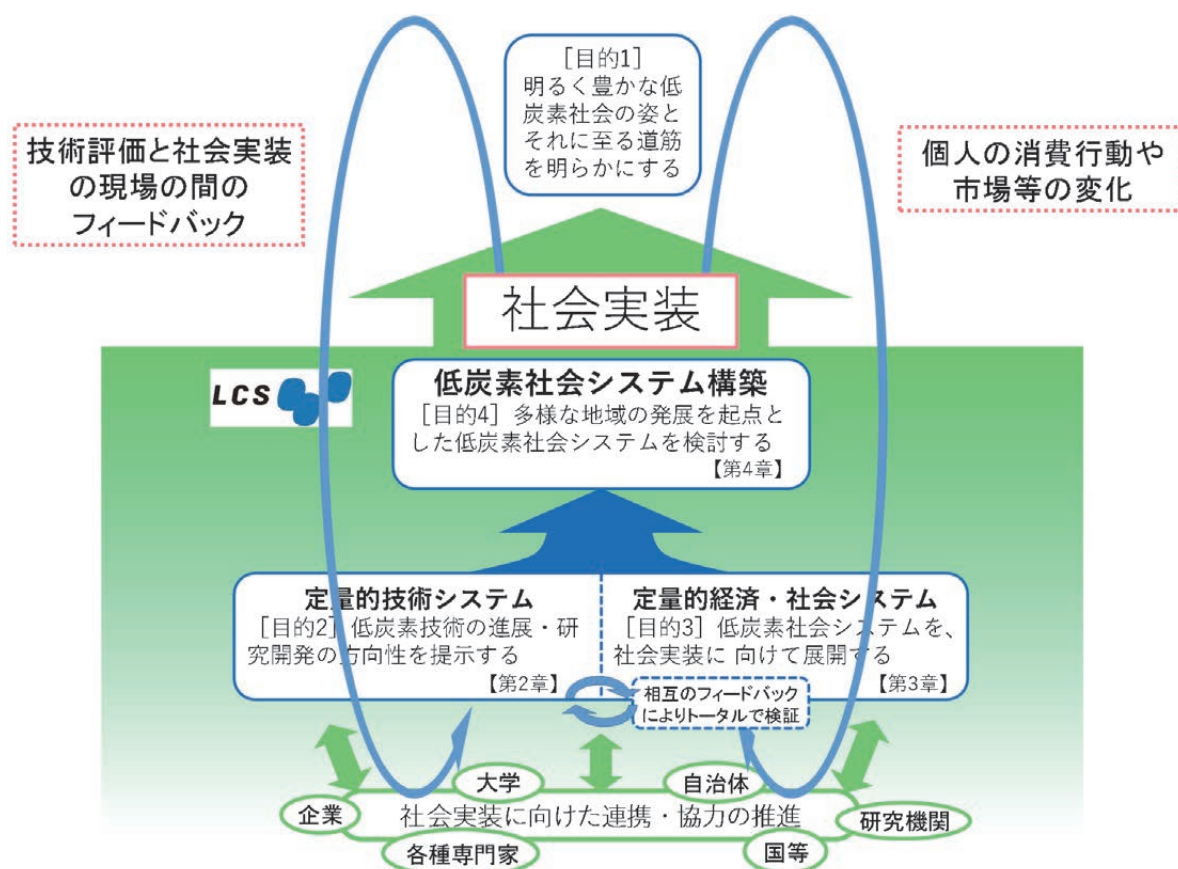


図 1-3 技術普及と社会変化のダイナミックな時間的プロセスの概念図

LCS は、これら社会シナリオ研究の成果を、国、大学、企業、地方自治体等の関係機関及び広く一般に向けて発信するとともに、JST 内外の制度や他機関との連携を通じて、幅広い活用を促すことで、これからの低炭素社会の実現に貢献していく。

第 2 章 低炭素技術の進展・研究開発の方向性を提示する～「定量的技術システム研究」の視点から

第 2 章では、【目的 2】「低炭素技術の進展・研究開発の方向性を提示する」視点から、定量的技術システム研究に基づく技術評価の結果を紹介する。

LCS は、我が国の経済・社会の持続的発展を伴う、科学技術を基盤とした「明るく豊かな低炭素社会」の実現に貢献するため、2030-2050 年の望ましい社会の姿を描き、その実現に至る道筋の選択肢を定量的に示している。一般に、新しい技術の開発・普及には何十年という時間を有する。しかし、IPCC など科学的な評価研究や昨今の地球温暖化をめぐる国際情勢から、2050 年に温室効果ガス排出量 80%削減、更には脱炭素といった低炭素エネルギーシステムの構築が求められており、早期の低炭素技術開発・普及のための戦略的なエネルギー技術開発の加速が不可欠である。そのためにも、低炭素エネルギーシステムに寄与する多様な技術を多角的に評価し、求められる重要技術開発項目と目標達成時期を明らかにすることが必要である。

LCS の定量的技術システム研究では、これまで、特に重要なエネルギーシステムを設計・評価し、低炭素技術のコストの将来見通しを示すとともに、技術進展や低コスト化の障壁となる技術課題と、課題解決に向けた研究開発の方向性を明確にしてきた。低炭素技術の普及促進には、技術性能の向上のみならず導入に係るコスト低減が技術を速やかに普及させる重要な要素である。このため、LCS では将来のコスト低減に寄与する核となる要素技術を特定し、研究開発の方向性を明確にすることに重きをおいている。原理から製造までの技術評価に基づきコスト構造を分析した独自の評価方法であり、その新規性は各事例研究として報告し[1],[2]、関連部局・関連機関と連携し展開してきた²⁾。また、個々のエネルギーシステムの技術評価では、不断に最新のデータを取り込んで「最新の課題」を明確にしている。評価する低炭素技術のシステム設計、製造プロセスには常に「新しい原理」、「新しい製造技術」を反映しており、「新しい技術、将来の技術」に対してリニューアルしている。言わば定量的技術システム研究は、ダイナミックなプロセスである。技術開発と市場動向による世界のうねりに客観的かつ動的に対応し、評価するためにも、LCS 定量的技術システム研究においてもたゆまぬ発展と進化が続いている。本文書では最新のデータに基づく各エネルギーシステムの技術評価に加え、更に、低炭素エネルギーシステムに求められる新しく開発された技術、多様なエネルギー源、重要な役割を担うエネルギーシステム技術などを評価した成果を、「社会シナリオ第 2 版」以降の新しい内容として紹介する。

なお、本章で述べる技術評価では、低炭素技術の進展と研究開発の方向性を提示する目的から、技術普及による重要な要素となるコストについて技術進展を考慮して分析している。ここでは技術単体を評価するため企業活動に起因する一般管理費や研究開発費、政府の補助金などの支援策は考慮していない。一方、低炭素技術が社会に受容されるには、社会システムに導入されるための費用や制度の問題を新しい社会システムの評価と同時に複合的に考慮して評価していくことが不可欠となる（第 3 章及び第 4 章参照）。

²⁾ ALCA ボトルネック技術課題に対する知見の提供、日本学術会議と再生可能エネルギー導入の課題を抽出、NEDO-TSC 共催ワークショップ開催、ビジョン主導型の研究開発プログラム COI との連携等（第 2 章 6. 「定量的技術システム研究成果の活用・普及に向けて」参照）。

参考文献

- [1] 山田興一, 太陽光発電の大規模普及に向けた開発, Nature photonics technology conference, 2010.
- [2] T. Inoue, K. Yamada, “Economic analysis of future thin film solar cells -Cost estimates for high-efficiency compound thin film tandem solar cells based on process design”, EU-PVSEC, 2016.

2.1 定量的技術シナリオの構築と活用

2.1.1 対象とする技術・システム

低炭素社会では、再生可能エネルギーの一層の利用が不可欠である。現在、社会で利用されているものは太陽光発電、太陽熱利用、風力、水力、バイオマス、地熱などである。再生可能エネルギーによる不安定な供給を補うために蓄電池に期待が寄せられる。また高効率発電あるいは熱電併給技術の利用も重要である。カルノー効率の制限がない燃料電池と、燃料電池を使ったトリプルコンバインドシステムなどが挙げられる。将来の低炭素社会において、各部門（家庭、業務、運輸、産業）へのエネルギー供給は、上記のような技術の組み合わせである。LCS では組み合わせを検討するために必要な基礎情報となる技術性能・コスト評価を行っている。

エネルギーシステムは、それぞれの技術特性や開発・普及状況により、評価すべき対象・段階が異なる。LCS では各技術シナリオを定量的に示すとともに、各エネルギーシステムの特性に合わせた評価を進めている。本章では、まず定量的技術システム研究における研究手法と考え方を記す。次に、重要度の高い低炭素技術として LCS が継続的に取り組んでいる太陽電池・蓄電池・燃料電池について、技術進展とコストに関する最新の見通しを具体的に示し、新たに普及拡大に向けた条件と役割を明確にし、取り組むべき研究開発課題を提示する（第2章2.2節）。特に太陽電池では、定量的技術システム研究を活用した将来技術の詳細な評価について解説している。また、エネルギー供給源の多様化に貢献すると期待される中小水力・地熱発電・木質バイオマス・バイオマスのメタン発酵について、コスト低減の見通しと今後の研究開発課題、今後の定量的技術システム研究の方向性を示す（第2章2.3節）。更に、低炭素技術を組み込んだエネルギーシステムに重要な役割を持つ技術（例：CCS、将来的な水素の役割等）をシナリオ研究の対象とした（第2章2.4節）。これらエネルギーシステム全体についてコストや CO₂削減効果、環境性等の将来見通しの定量的な評価へとつなげていく。また、定量的技術システム研究における技術分析と物質・材料研究開発に資する情報基盤「データ活用型研究（マテリアルズ・インフォマティクス）」とを結合させた取り組みも行っており、紹介する（第2章2.5節）。

2.1.2 定量的技術システム研究とその手法

定量的技術システム研究では、技術の根幹である理論や原理、活用する元素、ナノからメソスケールの構造と機能、製造プロセスの設計と評価、製品のコスト構造と環境性評価、エネルギーシステムの設計と評価を行い、低炭素技術の性能及びコストの将来見通しを定量的に示す。そして、これらの評価から、技術の進展や低コスト化の障壁となる技術課題を明らかにし、課題解決に向けた研究開発の方向性を明確にする。図 2-1 に、評価対象技術システムにおける評価のための研究手法のフローを示す。LCS では、「低炭素技術設計・評価プラットフォーム」の構築に取り組み、既存の技術のみならず新しい技術に対しても、その設計と評価の迅速な実施

を可能とすることを目的としている。機器や原材料、用役（電力、燃料、工業用水等）などの内訳や費用のデータを含む基盤データベースを中核とし、プロセス設計の手順を用いてコスト・環境負荷を計算し、対象とする技術の想定した技術水準における定量的技術シナリオを構築する。

今後の社会に導入する低炭素技術の実用化への見通しの検討は、現在の技術水準がその理論値に対してどの程度達成しているかを判断することから始める。現在の技術水準と理論値に開きがある場合は、性能の向上等により技術水準を上げていくための研究や技術開発が必要である。一方、技術水準が理論値に近い場合は、研究動向から新理論に基づく先端的な技術の実現可能性を検討する。また、性能に優れ、技術水準が高くても導入コストが妥当でない場合、社会への普及が困難になるため、製品製造等に係るコストの低減を目指した検討が必要である。このように示した複数の定量的技術シナリオをもとに、様々な要素を多角的に検討しつつ、コスト展望をはじめとする技術シナリオの比較や科学・技術ロードマップを提示する。それらが示す社会像は、定量的経済・社会シナリオや技術開発戦略において再評価され、将来の低炭素技術の技術水準の見通しや重要技術開発項目としてフィードバックされる。このような原理から技術評価を通じた経済・社会シナリオとの相互の評価サイクルを通じて、より具体的かつ統合的な低炭素社会に向けた研究課題の提案につながっている（図 2-1 参照）。

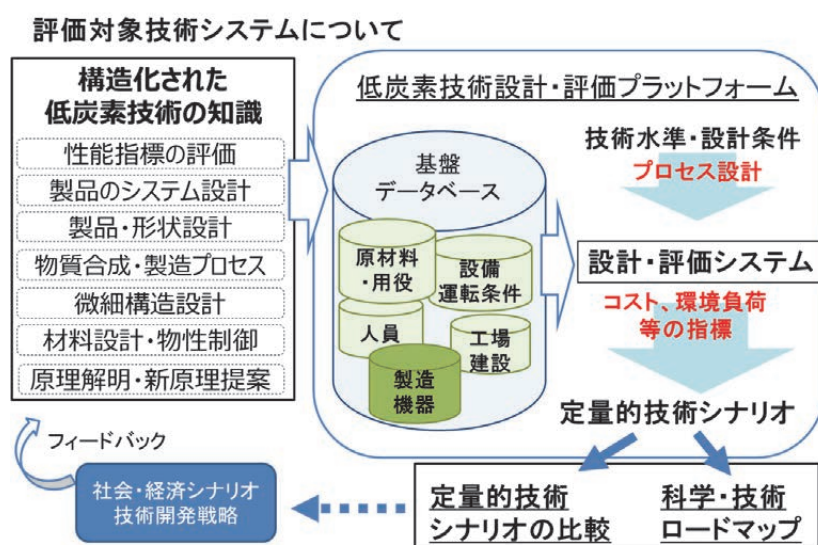


図 2-1 定量的技術シナリオの構築と活用

2.1.3 コスト算出方法

LCS の評価手法については、既報[1]-[4]にて公開している。ここでは、その主軸となるコスト算出の考え方について示す。定量的技術システム研究では、技術開発の観点からコスト低減効果を評価するために全て原価で表している。コスト算出にあたっては、後述する製造コスト以外の研究開発費、販売費及び一般管理費、借地料、システムの廃棄やリサイクルに係る費用等を含めていない。このコスト評価にかかるバウンダリーは、社会への導入費用という点から評価する NEDO など他機関のコスト見通しとは異なり、以下に示すシステム原価の考え方も併せ、技術開発に

主眼を置いた LCS 独自の方法であり他と一線を画すものである。

製造コストは、製造変動費と製造固定費から構成される。製造変動費は、原材料・用役の原単位（単位生産量当たりの投入量）とその単価から求められ、一定期間（通常は年間）の生産量に対応した変動費として算出する。一方、製造固定費は設備と人員に関する費用から成る。製造機器費の積上げコストを基に算出した総建設費に、適切な年経費率³⁾を乗じて年間設備対応固定費を求め、次に、運転要員数と年間人員単価から、年間人員対応固定費を求める。

低炭素技術は常に進展しており、低炭素技術による経済性や環境負荷の将来を見通すには、最新の研究開発成果や次世代研究開発の進捗状況などの研究開発動向を定量的技術システム研究に随時取り入れていくことが重要である。本手法を用いることで、このような新しい技術的情報を反映しやすくなるとともに、市場状況など現実の機会や障壁を分けてコストを見積もることができ、シンプルかつ本質をとらえた評価が可能となる。

参考文献

- [1] LCS提案書(FY2014-PP-00)、平成25年度総合編「『明るく豊かな低炭素社会』の実現を目指して」、2014年6月。
- [2] LCS提案書(FY2013-PP-07)、技術開発編「『低炭素技術設計・評価プラットフォーム』の構築」、2014年3月。
- [3] LCS提案書(FY2014-PP-10)、技術開発編「『低炭素技術設計・評価プラットフォーム』の構築(Vol.2)」、2015年3月。
- [4] LCS提案書(FY2014-PP-11)、技術開発編「プロセス機器選定と製造コスト、環境負荷産出のための基礎データベース作成－製造機器・材料・コスト情報の構造化－」、2015年3月。

2.2 太陽電池の定量的技術シナリオ及び燃料電池・蓄電池の新しい課題

LCS では、材料及びシステム開発で、高性能化や低コスト化が望まれる技術、大規模に利用可能な技術について順次、検討対象として取りあげている。ここでは、「社会シナリオ第 1 版」から検討を開始していた、太陽電池、蓄電池、燃料電池の三電池について詳細に報告する。既報では、現状及び将来の定量的技術シナリオを構築し、必要な研究課題を階層的及び経時的に整理し、重要技術開発課題と達成すべき時期を示した科学・技術ロードマップを示してきた。本文書では、基軸のコスト低減に加え、最新の技術動向を反映し、革新的技術開発の側面、普及段階まで広げて評価した結果を紹介する。

特に太陽電池については、定量的技術システム研究とその拡張における進捗を詳しく説明する。太陽電池では、世界的に急激な普及が進んでおり、製造コストも他の技術と競合可能な水準に近づいている。既報では、既存技術の延長によるコスト低減に加え、挑戦的な技術開発の実現によるコスト展望を示してきたが、新たな技術開発の在り方が問われており、本文書では、新規技術、特に高効率タンデム型太陽電池について各種太陽電池の技術より詳細に評価した。また、燃料電池では、LCS

³⁾ LCS では、コスト構成の重要な要素である設備対応固定費を算出するために、各低炭素プロセスの年経費率を、当該設備の耐用年数、補修費割合、租税公課などを考慮して個別に設定しており、現状では、0.08～0.3 の数値を採用している。

提案書(FY2013-PP-04)で示したようにコスト低減を踏まえた技術開発の目途が立つ一方で、普及拡大に向けた条件と役割を明らかにする必要があった。そこで、家庭用に加え、中型・大型のシステムを評価し、利用まで考慮して水素等の将来の燃料も踏まえて評価した。蓄電池では、LCS 提案書(FY2013-PP-03)でコスト低減の道筋を示したように、コスト低減の実現と普及が始まったところである。一方で、材料から評価した種々の蓄電池システムの評価が求められており、新たにリチウムを主軸とした新規蓄電池を評価した。すなわち、LCS 提案書(FY2013-PP-03)のリチウムイオン蓄電池に加え、新規技術を評価し、特定の新規正極活物質と新規負極活物質を組み合わせた蓄電池、及びリチウムイオンより更なる高いエネルギー密度が期待されているリチウム空気電池について検討した。

2.2.1 太陽光発電システム

【LCS 提案書番号：FY2014-PP-03】⁴⁾

【LCS 提案書番号：FY2015-PP-01】⁴⁾

太陽光発電システムは広く普及し始めているが、大規模な導入に向けて更なるコスト低減が不可欠であることから、LCS では、将来の技術開発を考慮したコスト削減技術の評価している。既報では各種太陽電池を対象に定量的技術シナリオを構築し、将来の技術展望から 2030 年に太陽光発電システムの発電コストが 5 円/kWh に達成する道筋を示した[1],[2]。2030 年に向けては、現状技術の延長ではない新しい技術開発が不可欠であり、低コスト実現には、原材料の消費原単位の低減、高効率化技術が重要技術開発項目であることを示してきた。本節では、2030 年に向けた新しい技術開発を考慮した定量的技術シナリオを構築し、高効率化タンデム型太陽電池を対象に、原材料、製造工法、システムの構造の違いによる影響を評価した。特に、技術開発には不確実性があるため複数の技術の違いを考慮して、将来の技術開発に向けた戦略を立てる必要がある。そこで、既存技術の延長と、複数の技術群とを比較した経済性評価の結果を示す。また、評価結果を踏まえた将来の定量的技術シナリオの活用事例として、太陽光発電システムのコスト展望と科学・技術ロードマップについて解説する。

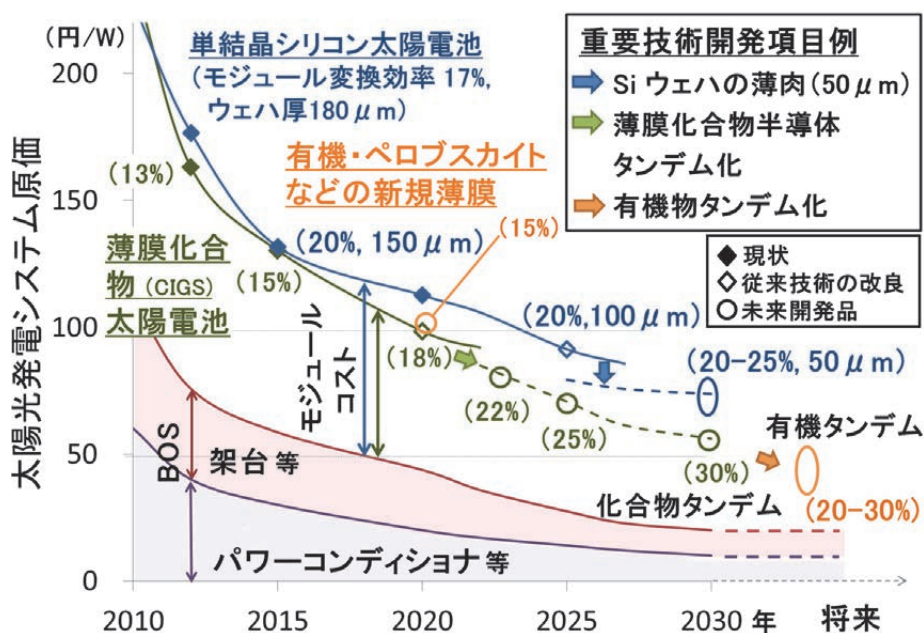
(1) 定量的技術シナリオの活用例

これまでに、技術シナリオを構築して、多種の太陽電池、技術水準について比較検討してきた。そこから、コスト展望を描き、現状技術の進展と、新しい技術開発によるコスト低下の効果を示してきた。本文書では、更に新しい技術開発による効果を、異なる材料、構造を基に、種々の技術の有用性を定量的技術シナリオを用いて示す。

特に、2030 年に向けて、化合物系半導体太陽電池のコスト低下が見込まれており、このコスト水準に比較して、他の技術開発に優位性があるかどうか論点となる。経済性の比較においては、時間軸を強く意識することが必要であり、単純に「将来コストが下がる」かどうかではなく、いつまでにどの程度コスト低下をさせて普及させるべきか、を含めた議論が肝要である。

そこで、ここでは複数の定量的技術シナリオを比較し、様々な技術水準の時間推移を考慮して構築した、コスト展望について説明する。図 2-2 に、太陽光発電システム原価と構成要素の展望を示す。現状技術から 2030 年までの技術進歩を考慮したシステム原価の推移を示したものである。2015 年のシステム原価（◆）は市場の平均的な性能の太陽電池モジュールを設計して算出した。現在見通すことのできる技術の組み合わせによるシステム原価を算出した結果を（◇）と実線で、挑戦的な研究開発の達成による将来のシステム原価を（○）と点線で示す。現状技術の延長（実線）と挑戦的な技術開発を達成した将来技術（点線）の間には、新しい技術開発が必要であり、このための重要技術開発項目を示した。このように、新しい技術開発には、2030 年にシステム原価で 60 円/W 以下となる技術を評価し、実現可能性や経済性以外の優位性なども考慮して達成すべき指標と時期を明確にした戦略的な技術開発の必要性を提言している。

⁴⁾ 本項目では、LCS 提案書(FY2014-PP-03)及び LCS 提案書(FY2015-PP-01)を中心に概説する。
LCS 提案書番号については巻末を参照。



実線：現在見通されている量産可能な技術の組み合わせによるコスト低減
 点線：研究開発により実現を考慮したコスト低減
 コスト算出にあたっては、製造コスト以外の研究開発費、販売費及び一般管理費、借地料、システムの廃棄やリサイクルに係る費用等を含めていない。

図 2-2 太陽光発電システム原価と構成要素の展望

(2) 技術開発の評価とシステム原価の将来展望

2030 年に向けた技術開発のため、既報で示したシステム原価 60 円/W と比較し、新しい技術の優位性と実現可能性を考慮した比較結果について示す。ここでは、基板技術が成熟して安定性も高く資源制約の優位性が高い結晶シリコン系太陽電池と、製造工程数が少なくコスト低下の見通しが立っている薄膜化合物半導体太陽電池を対象に、新しい技術・材料・デバイス構造を比較した。発電層では太陽光の波長に対して材料の特性に応じた範囲の波長を吸収できる。このため、タンデム構造では、特性の異なる材料の発電層を積層することにより、より幅広い波長を吸収することが可能となる。高効率を狙ったタンデム型太陽電池について、結晶系シリコン太陽電池では、トップ層に異なる材料を異なる製造方法で成膜した際の経済性を比較した[3]。薄膜化合物半導体太陽電池では、タンデム型とする太陽電池の構造に着目し、異なる構造における経済性を比較した[4]。更に、分析を進めている有機や量子ドットなどの太陽電池技術についても分析結果を示す。それぞれの技術は理論的な効率限界や安定性、既存の技術の成熟度が異なっており、経済性とともにより重要な技術課題を提案している。

○高効率タンデム型結晶シリコン系太陽電池の技術シナリオ

結晶シリコン系太陽電池では、2030 年以降の技術水準において、モジュール変換効率 30%を達成すると仮定したタンデム構造の太陽電池を評価した。分析においては、シリコン基板のウェハ厚、トップ層の材料、モジュール変換効率、生産性などにおける技術指標を設計し、定量的技術シナリオを構築した。バンドギャップから、

理論的に最適となる材料を想定[5]し、トップ層に、ペロブスカイト、有機、化合物系半導体のカルコパイライトを対象として太陽電池を設計した[6]。カルコパイライトには CIGS (Copper Indium Gallium Selenide) 系を想定し、光吸収層はスパッタにより積層する。有機は高効率の達成に課題が多いが、塗布型であれば廉価に製造できるメリットがある。ペロブスカイトは、MOCVD 及び塗布の 2 種の製造工程、有機は、塗布の製造工程について分析した (図 2-3)。トップ層として製膜するペロブスカイトは文献[7]、有機薄膜は文献[8]の構造を用いた。

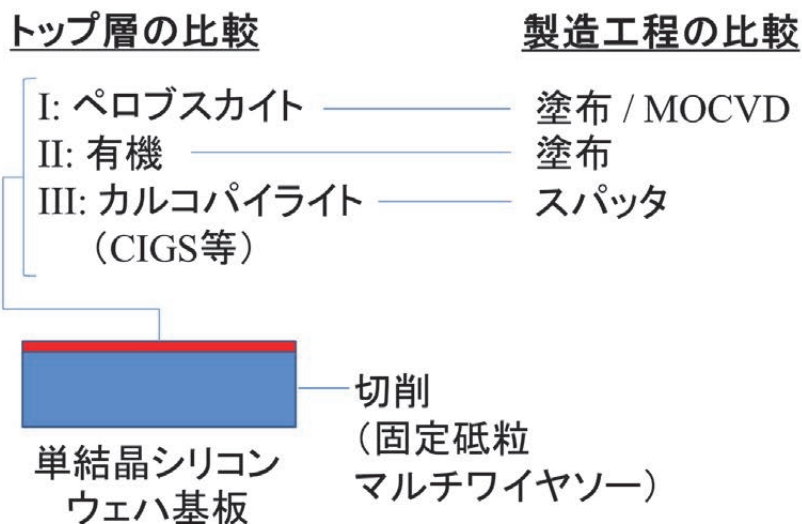


図 2-3 タンデム型のトップ層の技術シナリオ

【LCS 提案書番号 : FY2014-PP-03】

トップ層について、低コストとなる製造技術 (塗布など) と廉価な材料 (有機) の優位性の分析結果を記す。単層では、2030 年のシステム導入原価は 78 円/W に対し、タンデム型を実現した高効率化により、シリコンの消費量は 1g-Si/W 以下となる。タンデム型にすることにより、60 円/W 以下を見込めることがわかった。

トップ層をペロブスカイトとしたケースの MOCVD による製膜では生産性が低く、設備費、用役費が非常に大きく、また原材料も高いため 10 倍以上のコストとなった。一方、塗布型である場合には、ペロブスカイト、有機、共に、それぞれ 58 円/W、56 円/W となった。トップ層を CIGS の製造工程を基準に算出した例では、66 円/W と、塗布型ペロブスカイト及び有機よりは高い。一方、ペロブスカイト及び有機においては、安定性・大面積化の課題があり、これらの課題を克服しつつ、高効率化のための研究を進めることが必要である。

図 2-4 に、結晶シリコン太陽電池のモジュール変換効率とモジュール製造原価の比較を示す。現状の技術水準の延長では、モジュール変換効率の向上により、103 円/W から 86 円/W となり、更にウェハ厚を現状の 180 μ m から 50 μ m 以下とするワイヤ強度向上 (現状の 4GPa から 7GPa 程度) 等の切削技術の向上により Si 必要量を低減させることで 55 円/W が実現可能となる。一方、有機系 (塗布型) を用いてタンデム化による高効率化を達成することにより、40 円/W に向けたコスト低減が見えてきた。

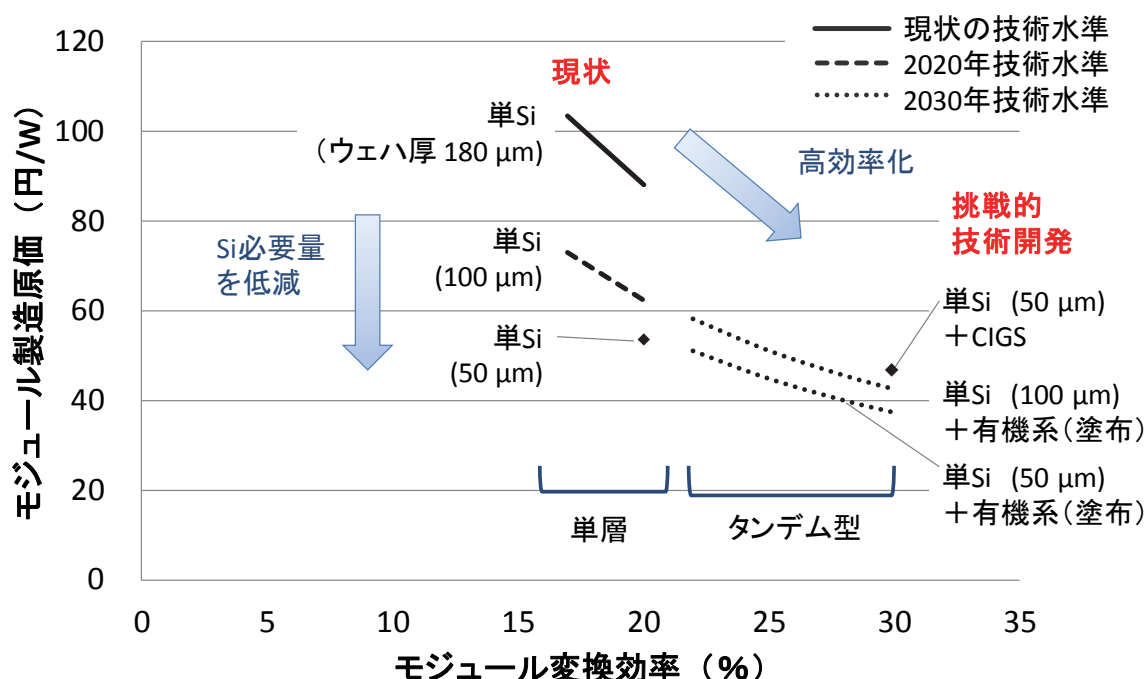


図 2-4 結晶シリコン太陽電池のタンデム化とモジュール変換効率による製造原価の比較
 【LCS 提案書番号：FY2014-PP-03】

高効率化を達成しても、製造工程（MOCVD と塗布など）によって、製造コストが一桁異なる。また、大面積化や安定性の技術開発によって、製造コストが異なるため、種々の要素技術の製造コストに与える影響を評価した定量的技術シナリオを構築して評価することが重要である。

このように、将来の技術開発の達成目標時期を実現するために、技術進歩とコストの関係の明確化の重要性がわかる。LCS では継続して種々の太陽電池技術の定量的技術シナリオを構築し、評価を進めていく。

○構造の異なる CIGS 化合物半導体太陽電池の技術シナリオ

ガラス基板に電極、発電層、透明電極を積層したサブストレート型の太陽電池を設計した。図 2-5 に、対象とした CIGS 太陽電池の構造を示す。基準ケースとして、①発電層を単層とし、電極、バッファ層等の各層は現状技術水準に基づき設計した。更なる高効率化のため、幅広い波長を吸収できるタンデム構造として②4 端子型と③2 端子型を対象にモジュール製造原価を比較した[2]。②4 端子型は、発電層にそれぞれ電極をつけ、それらを重ねてセルとする。ボトムとトップの発電層それぞれを、独立に設計・製造することが比較的容易であるため、既に製品化が進行している。一方、③2 端子型では、発電層を直接積層する。発電層の電流を同一にする設計や界面制御が難しいため、実験段階である。

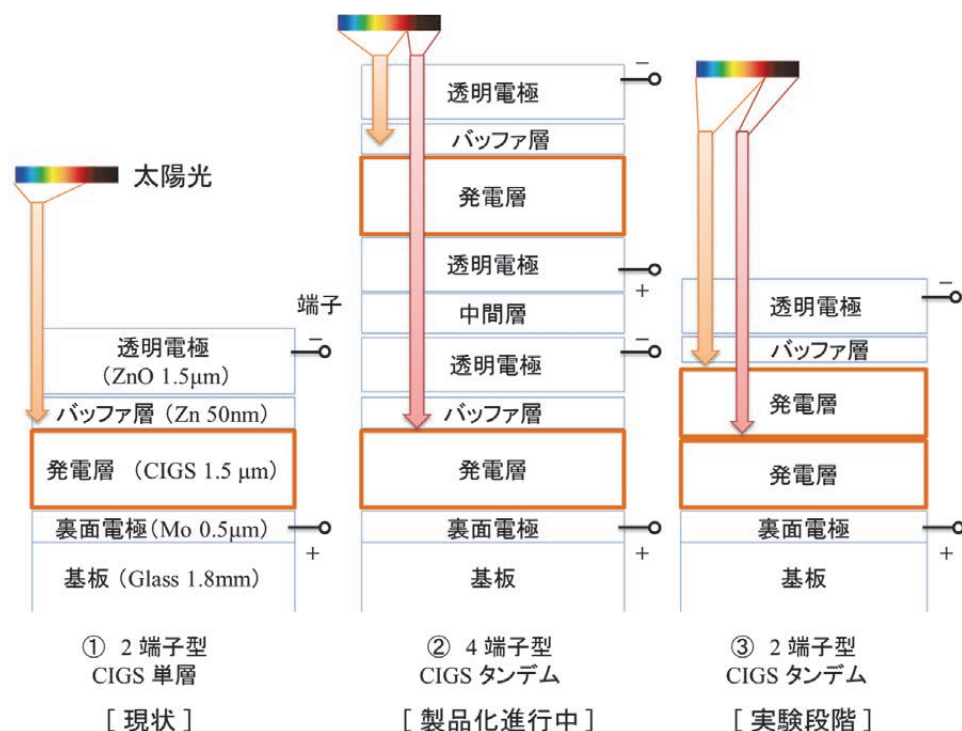


図 2-5 CIGS 薄膜太陽電池の構造

【LCS 提案書番号：FY2015-PP-01】

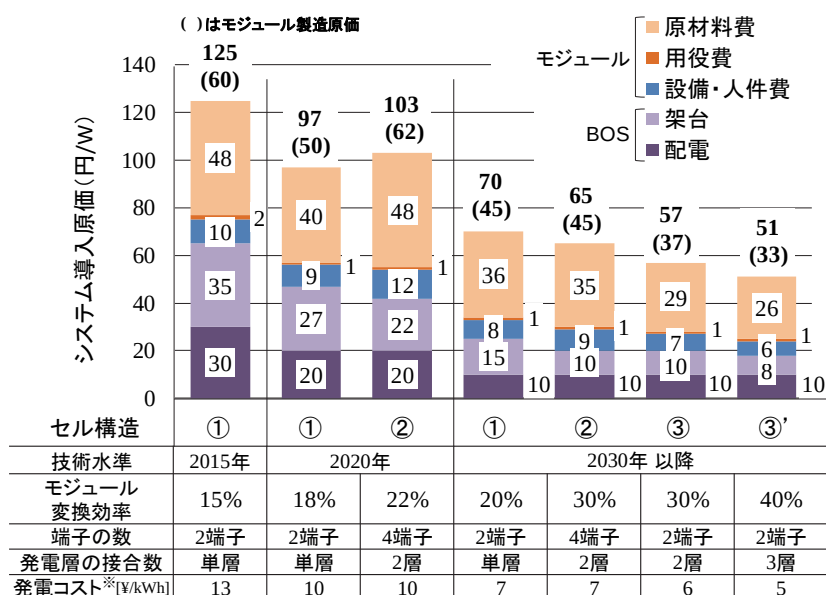
図 2-6 に、2015 年、2020 年、2030 年以降の技術水準におけるコスト構造を示す。2020 年の主なコスト低減の要素はモジュール変換効率の向上、生産性の向上に関する項目である。①単層 2 端子型太陽電池では、モジュール変換効率 18%が見込まれており、モジュール製造原価が 50 円/W、システム導入原価が 97 円/W である。一方、②2 層 4 端子型太陽電池では、モジュール変換効率 22%が見込まれるものの、材料が多種必要となるためにモジュール製造原価が 62 円/W、システム導入原価が 103 円/W と試算された。両者ともに発電コストは 10 円/kWh となる。②2 層 4 端子型の太陽電池は製品化が進行中であるが、モジュール変換効率 22%以上を 2020 年に到達することが競合可能な水準となることがわかる。

更に、実験段階で試みられている挑戦的な技術課題を達成した技術水準（③2 層 2 端子型太陽電池、③'3 層 2 端子型太陽電池）を想定したケースについても試算し、ここでは 2030 年以降として記している。理論変換効率から材料の組み合わせを検討し、各構造の理論変換効率と技術開発の現状から、各シナリオの技術水準を定めた。①単層太陽電池では、モジュール変換効率 20%を比較水準とした。CIGS 太陽電池セルの実験室段階でのセル変換効率は 21%に到達しており、セル変換効率で 25%を超える技術開発が必要な技術水準である。2 層、3 層については基礎研究が必要な段階ではあるが、理論変換効率を元に、モジュール変換効率を 3 層で 30%、3 層で 40%を基準としてモジュール製造原価を試算した。

試算の結果、①単層太陽電池のモジュール製造原価 45 円/W、システム導入原価 70 円/W に対し、②2 層 4 端子型太陽電池ではモジュール製造原価 45 円/W と同等であるが、変換効率が高いためシステム導入原価は 65 円/W と安くなることがわかる。更に③2 層 2 端子型太陽電池、③'3 層 2 端子型太陽電池のシステム導入原価は

それぞれ 57 円/W、51 円/W であり、コスト削減ポテンシャルが高いことがわかる。また、図 2-6 に太陽光発電システムの耐用年数を 20 年として年経費率は 0.1、設備容量 1W 当たりの年間発電量を 1000Wh/年（日本の平均的な日射量）とした場合の発電コストを記している。将来の太陽光発電システムのための変動制対策にかかる追加費用なども考慮すると更なるコスト低減が必要であるため、発電コスト 5 円/kWh を目指したこのような技術開発が必要となる。

このように、②4 端子型は製造が容易である一方、材料が多種必要となる。③2 端子型は積層技術などの開発課題が多い。コスト低減には、界面制御や光閉じ込め技術、接合界面の制御など、高効率化に寄与する技術開発が必要である。また、将来のために並行して資源量の多い化合物元素を用いた新しい技術開発も必要となる。



※太陽光発電システム発電コストは年経費率を 0.1、年間発電量を 1000Wh/年/W とした。

図 2-6 現状及び将来の CIGS 太陽光発電システムのコスト構造

【LCS 提案書番号：FY2015-PP-01】

○新たな太陽電池の技術との経済性評価と今後の展望

太陽光発電システムの更なる低コスト化に向けて、特に高効率化に向けた様々な技術評価が必要となる。一方で、理論効率や製造技術などを個別に評価するだけでなく、高効率を達成するための原理と技術成熟度、製造コストを総合的に評価し、将来普及可能な技術を選択していくことも求められる。2030 年以降の新しい太陽電池技術として、資源制約（Ga, In, Ge, Te 等）、環境負荷（Cd, As, Pb 等）なども考慮して、2030 年以降の将来に期待される新たな太陽電池を対象にコスト構造を分析している。将来の太陽光発電システムでは、将来のコスト水準（2030 年の太陽光発電システム原価で 60～70 円/W）と比較し、競合可能な技術見通しが必要となる。

量子ドットは物質固有のバンドギャップを制御できることから効率を大幅に向上されることが期待されている。資源制約の少ない結晶シリコン系太陽電池ではセルの理論変換効率が約 29%であるが、例えば 3 接合のバンドギャップ(1.1/1.5/2.0eV)とするシリコン量子ドット太陽電池では、セルの理論変換効率は 45%を超える。しか

し、量子ドット構造は作製できてはいるが、現状では効率向上の結果は示されていない。また、単結晶シリコン太陽電池と比較すると、モジュール変換効率 30%を実現して製品化しても、システムコストは約 3 倍となることが示されている。このため、原理解明などの基礎研究に加え、生産性の高い異なる製造工程の技術見通しも検討することが必要となる。

III-V 族太陽電池では、既に非集光で 30%を超える高いモジュール変換効率を実現しているが、資源制約のある高価な材料を用いており、モジュール変換効率 40%を達成しても、原材料費、製造コストがともに高い。原材料消費量の低減や、10 倍以上の生産性の向上といった製造工程全体を考慮して、技術開発を進める必要がある。

有機系太陽電池では、塗布による大面積化が実現すれば低コスト化が見込まれるため、高効率化をいかに実現するか、原理解明から着手していくことが望ましい。特にペロブスカイトは近年、セル変換効率 20%を超える太陽電池が実験レベルで実現しているが、安定性や大面積化、鉛の代替などの課題も多い。将来の技術開発においては、モジュール変換効率 30%となるタンデム化も視野に入れて原理解明から着実な研究開発を進めることが必要となる。

高コストでも、変換効率が高い利点を生かして、面積や重量当たりの出力が重要となる集光型などの特殊な状況下での用途もある。しかし、集光及び太陽光追従システムのコストが高く、経済性が成り立つのは日射量の多い国地域に限定される。集光型システム全体での低コスト化の明確な指針はなく、システム構造から抜本的に見直したシステムコストの総合評価及び開発が今後の検討課題となる。

LCS では、更に様々な新しい技術の評価し、将来に必要な技術開発と、その優位性に対する評価を進め、特に重要な技術開発項目を示した提案に資する研究を進めている。

(3) 科学・技術ロードマップと今後の研究開発課題

ここまで、種々の要素技術群を評価し定量的技術シナリオを構築する手法について説明してきた。更に、将来の技術展望を経時的に示し、それらの技術シナリオを比較することにより核となる重要技術開発項目を示してきた。コスト展望の図 2-2 で示したように、いつまでにどのような指標を解決すればよいかを評価している。それらの指標に到達するためには、具体的にどのような技術開発をつなげていくべきか、その道程を評価していくことも必要となる。

2020 年、2030 年のシステムコストを達成するために必要な研究課題を対象スケールによって階層的に整理し、時間軸に沿って示した「太陽電池の科学・技術ロードマップ」を図 2-7 に示す。横軸に時間軸をとり、達成目標とすべきコスト展望を示す。縦軸には必要とされる技術群を階層的に示し、原理から製品までのスケールにおいて、どのような技術が重要であることを示している。2030 年に向けた開発にはタンデム型の高効率化が不可欠であり、これらには界面制御の基礎的な研究から、高速製膜技術などの製造技術を同時に開発していくことが必要となる。このように、示されたコスト展望と必要な要素技術群の相互的な関係を考慮しつつ、戦略的な技術開発が求められることを示し、それを提言してきた。具体的には、太陽光発電システムの大規模な導入に向けた各種太陽電池の技術開発戦略として、以下の項目を提案した。

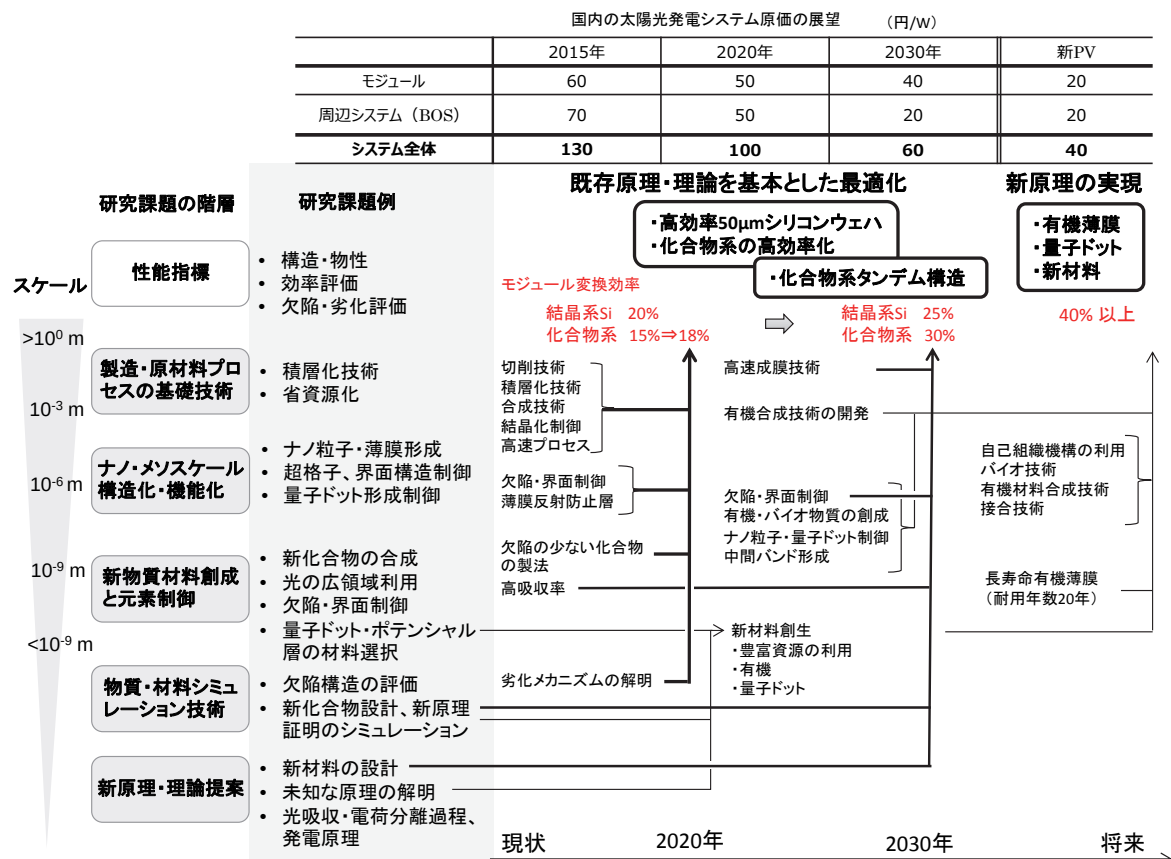


図 2-7 太陽電池の科学・技術ロードマップ

○高効率シリコン系太陽電池

シリコン基板のウェハ厚、トップ層の材料、モジュール変換効率、生産性などにおける技術指標を設計し、技術シナリオを構築した分析の結果、大規模な太陽光発電システムの導入には、シリコン基板のコスト低減のため、ウェハ厚を低減させる（シリコン必要量 1g-Si/W 以下）ための検討（理論値に向かったワイヤ線強化技術向上等）、タンデム構造による高効率化によるコスト低減、製造工程、耐久性なども考慮した技術開発を進めることが重要である。高効率化を達成しても、製造工程（MOCVD と塗布など）によって、製造コストが一桁異なる。また、大面積化や安定性の技術開発によって、製造コストが異なるため、種々の要素技術の製造コストに与える影響を評価した定量的技術シナリオを構築して評価することが重要である。

○CIGS 等の化合物系太陽電池

化合物系太陽電池は、モジュール変換効率 30% 以上の高効率化が要求される。高効率化技術を促進するため、結晶成長技術の加速、柔軟な積層技術の改良、界面制御技術や光閉じ込め技術への注力が必要となる。更なるコスト低減には、タンデム化による高効率化が不可欠である。特に CIGS 太陽電池では、接合法の開発が重要であり、構造の違いによる各要素技術の経済性及び技術開発の見込みを考慮し、達成目標・達成時期を明確にした技術開発戦略が求められる。

○Ⅲ-V 族系化合物太陽電池

ガリウム・ヒ素等、Ⅲ-V 族タンデム型太陽電池では、セル変換効率 40% 以上の高効率化の一方で、原材料費・設備費ともに高いこと、10 倍以上の生産性の向上が必

要であることが大きな課題となっている。

また、太陽電池の世界市場の拡大に伴い、原料や製造機器、周辺システムの価格も大きく変動する。更に、各国の技術開発への投資や支援によって、技術開発の進展と市場の動向は刻々と変化しており、継続して設計・評価をしていくことが重要である。

参考文献

- [1] 低炭素社会作りのための総合戦略とシナリオ, LCS, 平成24年7月.
- [2] LCS提案書(FY2013-PP-02)、技術開発編「太陽光発電システム-要素技術の構造化に基づく定量的技術シナリオと科学・技術ロードマップ」、平成26年3月.
- [3] T. Inoue, K. Waki, K. Yamada, “Cost estimates for PV manufacturing through 2030 – Potential for reducing costs using high-efficiency Si-based tandem solar cells”, EU-PVSEC, 2014
- [4] T. Inoue, K. Yamada, “Economic analysis of future thin film solar cells -Cost estimates for high-efficiency compound thin film tandem solar cells based on process design”, EU-PVSEC, 2016.
- [5] 山田興一, 太陽光発電の大規模普及に向けた開発, Nature photonics technology conference, 2010.
- [6] M. Liu, MB. Johnston, HJ. Snaith, “Efficient planar heterojunction perovskite solar cells by vapour deposition”, Nature 501, 395-398, 2012
- [7] M. Hosoya et al. “Development of organic thin film photovoltaic modules”, the 73th fall meeting of Japan Society of Applied Physics, 2012
- [8] K. Yamada, T. Inoue, K. Waki, “Future Prospects of Photovoltaic Systems for Mitigating Global Warming”, World Engineers’ Convention 2011 in Geneva, 2011.

2.2.2 固体酸化物形燃料電池システム～将来の電源構成における SOFC の役割と技術開発課題

【LCS 提案書番号：FY2015-PP-03】⁵⁾

LCS 提案書(FY2015-PP-03)では、固体酸化物形燃料電池（SOFC）システムの性能予測・コスト評価を基に、将来の電源構成における SOFC の役割と技術開発課題について検討を行った。燃料電池は低炭素社会実現における重要な技術であり、固体高分子形燃料電池（以下 PEFC）については、家庭用定置型電源及び燃料電池自動車用途での市場投入が開始されている。また、固体酸化物形燃料電池（以下 SOFC）については、PEFC と同様に、家庭用定置型電源の国内市場投入がなされており、今後は中・大型機への展開が予定されている[1],[2]。

SOFC システムの発電コストについては、実際の稼働率も考慮した場合において検討を行い、家庭用小型機では 28 円/kWh から 23 円/kWh への到達の可能性が示唆され、中・大型機では 14 円/kWh 程度までのコスト低減の潜在性を有することが示された。加えて、国内の電源構成における再生可能エネルギーの割合は今後大きく増加することが予想される。国内の電力システムの様相が変化する中で、今後、SOFC に期待される役割と競争力保持に向けた技術開発課題について議論した。すなわち、これまでの家庭用及び中・大型機の SOFC システムのコスト削減シナリオに基づき、感度解析による今後の普及拡大に向けた条件と役割（ベース電源、変動調整、水素製造・貯蔵）について明らかにした上で、今後の技術開発課題について検討を行った。

(1) 中・大型機用 SOFC の数値モデルシミュレーションと感度解析

コスト低減の潜在性を有する中・大型機用 SOFC を対象とし、技術シナリオの妥当性を検証する目的で、中・大型機の円筒横縞形セルの発電性能評価について有限要素法による数値モデル計算を行った。SOFC コンバインドサイクルシステム（以下、SOFC コンバインドサイクル）は、現在 250kW のシステムが開発されているが[3],[4]、その発電効率の高さから、今後の中・大型発電機としての普及が期待される。文献[4]の円筒横縞形単セル発電実験のデータ（図 2-8 の丸印）に基づき、標準セルについて数値モデルのシミュレーションを行い、電流電圧曲線の再現を行うことでモデルの妥当性について検証を行った（図 2-8 の青色実線（標準））。この検討結果に基づき、現在の実証機に相当する新型機についても電流電圧曲線の再現を行った（図 2-8 の赤色実線（新型））。更に、現在報告されている電極、電解質、インターコネクタの物性値（表面反応速度、イオン・電気伝導率）に基づき感度解析を行った。その結果、それら物性値の適切な改善によって、セルスタックの出力密度と発電効率の向上を同時に達成することは十分に可能であることが示された。

⁵⁾ 本項目では、LCS 提案書(FY2015-PP-03)を中心に概説する。LCS 提案書番号については巻末を参照。

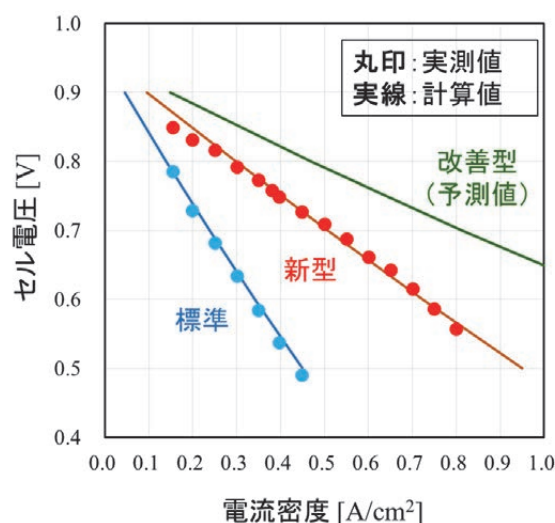


図 2-8 円筒横縞形単セルの発電性能評価

丸印：実測値（文献[4]）；実線：計算値；発電温度：900℃

(2) 中・大型 SOFC の発電コストの評価

図 2-9 に 250kW SOFC コンバインドサイクルの発電コストの稼働率依存性を示す。中・大型 SOFC システムの場合、大口利用が前提となるため、家庭用と比較して燃料コストの低減が可能であり、発電コストの面で有利になる。250kW SOFC コンバインドサイクルの都市ガス使用量から都市ガス価格[5]を算出すると、250kW コンバインドサイクル 1～4 台可動の条件（0.25～1MW）では、都市ガスコストは 90～100 円/Nm³ 程度になる。一方、15 台以上の可動条件（約 4MW）の発電規模になると、都市ガスコストは 80 円/Nm³ 程度になると見積もられる（図 2-9a に対応）。図 2-9 からわかるように、比較的小規模発電に相当する都市ガスコストが 90～100 円/Nm³ の条件では、小口系統電力コスト（23 円/kWh）と同等の水準になるには、稼働率が 50% の条件で 500 円/W のシステムコストが要求されるが、LCS 提案書(FY2015-PP-03)での製造コストの試算に基づくと、その条件は十分に達成が可能であり、将来的には大型の集合住宅やオフィスビルでのコンバインドサイクルシステムの活用が期待できる。一方、大口系統電力コスト（14 円/kWh）を達成するためには、都市ガスコストが 80 円/Nm³ の場合を想定すると（図 2-9a）、稼働率が 60% の条件で 200 円/W のシステムコストが必要条件になる。更に、天然ガスの国内原価である約 50 円/Nm³ を想定した場合（図 2-9b）、200 円/W のシステムコストで 10 円/kWh 程度の発電コストを十分に達成することができることが示され、SOFC コンバインドサイクルが、大型発電機としての潜在能力を十分に有することが示唆された。ただし、SOFC コンバインドサイクルの稼働率を上げるためには、定常運転での利用が必要であり、後述するように、今後はベース電源としてのスマートグリッド内での活用の検討が必要となる。すなわち、発電した電力を系統に戻す所謂「逆潮」を含めた運転モードの検討や、再生可能エネルギーと組み合わせたスマートグリッド内での活用により稼働率 50% 以上の実現が可能になると考えられる。

以上、SOFC コンバインドサイクルの開発目標について、都市ガスコストを考慮すると、中規模発電（250kW クラス）では、システムコスト：500 円/W；発電効率：55～60%；システム寿命：15～20 年が目標達成の必要条件になる。また、大規模発

電（数 MW クラス）では、システムコスト：200 円/W が必要である。このように、稼働率や発電規模の制約はあるが、中・大型 SOFC システムは、今後の技術開発の進展により広く普及が期待される発電システムである。

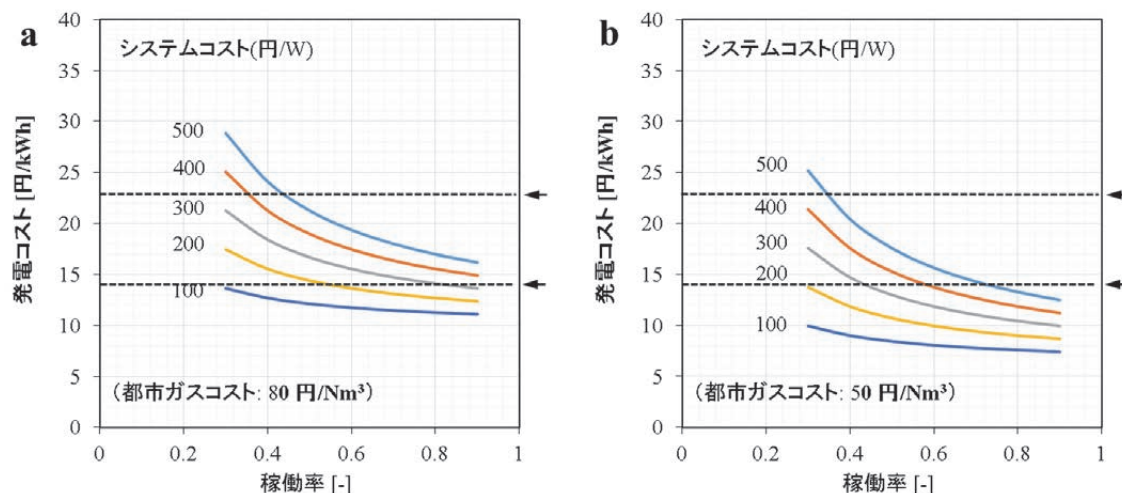


図 2-9 中・大型燃料電池（250kW SOFC コンバインドサイクルシステム）の発電コストの稼働率依存性

前提条件：発電効率 60%（LHV）；寿命 20 年（将来ケース）

発電コストに廃熱利用を含む（熱回収効率：15%、総合効率 75%（LHV）を仮定）

上の点線は小口系統電力コスト（23 円/kWh）、下の点線は大口系統電力コスト（14 円/kWh）を示している。

(3) SOFC の電力変動抑制への活用

政府の 2030 年の電源構成の見通しにおいて、再生可能エネルギーの占める割合の目標値は 22～24% である[6]。再生可能エネルギーの導入が大規模に進むに従い、その変動抑制が重要な技術課題となる。例えばドイツでは、再生可能エネルギーを電源構成の中心に据えて、その変動抑制（平準化）を火力でまかなう案が検討されている[7]。国内においても、スマートグリッドによる電力供給において、太陽・風力といった再生可能エネルギーとの共存が必要であり、その変動抑制が重要な技術課題となる。そこで、LCS の太陽電池・蓄電池に関するコストの試算[8]-[10]に基づき複合システムのコストについて検討を行った。太陽電池の発電量を 20 時間分蓄電するシステムを想定した場合、発電コストは 100 円/kWh～15 円/kWh の値が得られた。また、3 時間分の短時間の蓄電を想定した場合では 32 円/kWh～7 円/kWh と試算された。一方、上述の燃料電池の発電コストの議論から、SOFC の発電コストは、小型機で 28 円/kWh～23 円/kWh 程度になることが予想され、中・大型機では、14 円/kWh～10 円/kWh 程度と予想される。従って、SOFC システムの将来的な活用方法として、発電コストが十分に低減されることで、稼働率向上の観点からもスマートグリッド内のベース電源（特に中・大型機）としての活用（SOFC システムで発電した電力を系統に「逆潮」を含む）が考えられる。更に、蓄電システムを併用した太陽電池などの再生可能エネルギーとの共存が可能であり、かつ系統電力の変動抑制としての利用が期待される。ただし、電力変動の時定数毎に最適な対応策の検討が必要であり、比較的短時間の変動抑制についてはガスタービンや蓄電池の利用

が考えられ、燃料電池は比較的長時間の変動抑制での活用が期待される。

(4) SOFC の水素製造・貯蔵システムへの応用：再生可能エネルギーによる水素製造コスト試算

再生可能エネルギーの導入が大規模に進むに従い、余剰エネルギーの貯蔵技術の検討が必要になる。燃料電池では、水電解による水素製造が考えられる。LCS 提案書(FY2015-PP-03)では、再生型（可逆型）SOFC システムによる水素製造コストについて検討を行っている。水電解効率（水素製造効率）を 80% に仮定すると、再生型（可逆型）SOFC の製造コストについては 100 円/W 程度までの低減の可能性が示唆される。一方、水素製造には水素ボンベ等の貯蔵設備が必要であるが[11]、それらを考慮したシステムコストについて 200 円/W 程度までのコスト低減は可能であると考えられる。また、太陽電池の現在の発電コストは、国内においてもグリッドパリティ（系統電力コスト 23 円/kWh と等価）に到達しつつあり[12]、将来的には 10 円/kWh から 5 円/kWh 程度への発電コストの低減が可能であることが示されている。また、将来大量導入が予想される太陽電池の余剰電力を捨てる場合を想定すると、余剰電力コストを 0 円/kWh に想定することも考えられる。以上の想定に基づき、再生可能エネルギーの電力コストについて、25 円/kWh から 0 円/kWh の範囲で水素製造コストの感度解析を行った。NEDO のロードマップに基づき、水素製造コスト目標値（2030 年）をガソリン販売価格（4.2 円/MJ）と同水準を目標とした。水素輸送と水素ステーションを含まない場合、システム稼働率を 100% とすると、この目標値を達成するには再生可能エネルギーの電力コスト 10 円/kWh 以下かつシステムコストが 200 円/W 以下の必要条件を満たす必要がある。一方、太陽電池の稼働率（国内平均 12%）を考慮して、システム稼働率を 12% に設定した場合、余剰電力 0 円/kWh を仮定した上で、システムコスト 100 円/W が必要条件であることが示唆された。水素輸送及び水素ステーションを仮定すると水素製造コストは 7.4 円/MJ 程度の値となった。表 2-1 にその前提条件と水素製造コスト試算の結果を示す。これらのことから、再生可能エネルギーの余剰電力を水素に変換・貯蔵するシステムは、今後の格段の技術開発とコスト低減が必要であることがわかる。更に、「水素輸送と水素ステーションを前提」とする場合、輸送やインフラコストの低減も非常に重要になる。

表 2-1 水素輸送と水素ステーションを含む水素製造コスト試算の前提条件

水電解＋圧縮（固定費＋変動費）	3.7	円/MJ
基地・輸送*	1.7	円/MJ
水素ステーション*	2.0	円/MJ
合計	7.4	円/MJ

*LCS 試算に基づく

(5) 今後の課題と提案

再生可能エネルギーによる出力変動や余剰電力の問題解決の観点から、次世代の電力系統内での SOFC の活用（ベース電源・出力変動調整、及び水素製造等によるエネルギー貯蔵システム）についても今後の研究開発の活性化が必要である。本検討では、SOFC のベース電源としての活用（逆潮を含む）による出力変動の抑制について、今後の技術革新によって経済的に成立する可能性が示唆された。一方、再生可能エネルギーの余剰電力を前提とした水蒸気電化による水素製造プロセスの実現については、今後の格段の技術革新とコスト低減が必要であることが示された。これらの議論を基に、定置型 SOFC システムの技術開発項目をまとめた。

- 1) 稼働率を考慮したシステム性能・コスト低減の目標値の提示
- 2) システムの運用面に関する改善点の提示（家庭用：燃料コストの低減、稼働率向上；中・大型機：通常の発電システムとしての普及に加え、スマートグリッド内のベース電源としての変動調整・逆潮による活用）
- 3) 水素製造・貯蔵プロセスを含むシステムの活用と課題（電極の性能・耐久性向上と格段のコスト低減）

以上、今後の技術革新の進捗によるが、太陽・風力等の再生可能エネルギーと SOFC システムとの共生が可能であることが示唆された。

参考文献

- [1] 日本電機工業会(2015)Topics: 2014年度定置用燃料電池発電システム出荷量統計調査報告、電機2015年6月号777: 68-71,
<https://jema-net.or.jp/Japanese/res/fuel/images/chousakekka.pdf>.
- [2] LCS提案書(FY2013-PP-04)、技術開発編「固体酸化物形燃料電池システムー要素技術の構造化に基づく定量的技術シナリオと科学・技術ロードマップー」、2014年3月。
- [3] LCS提案書(FY2014-PP-05)、技術開発編「固体酸化物形燃料電池システム (Vol.2)ー中・大型機SOFC製造コスト評価と技術開発課題ー」、2015年3月。
- [4] K. Tomida, N. Hisatome, T. Kabata, H. Tsukuda, and Y. Yamazaki, “Structural modification of segmented in-series tubular SOFCs using performance simulation and the effect of (Sm, Ce)O₂ cathode interlayer on the generation characteristics under pressurization”, *Electrochemistry*, 77 (10) 865-875 (2009).
- [5] 都市ガス価格（大口供給料金：東京ガス）、
<http://eee.tokyo-gas.co.jp/ryokin/about/list/r-oguchi.html>.
- [6] 経済産業省 長期需給見通し（2015年7月）、
http://www.meti.go.jp/press/2015/07/20150716004/20150716004_2.pdf.
- [7] 12 Insights on Germany's Energiewende（2013年2月）、
http://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2012/12-Thesen/Agora_12_Insights_on_Germanys_Energiewende_web.pdf.
- [8] LCS提案書(FY2013-PP-02)、技術開発編「太陽光発電システムー要素技術の構造化に基づく定量的技術シナリオと科学・技術ロードマップー」、2013年3月。
- [9] LCS提案書(FY2014-PP-03)、技術開発編「太陽光発電システム(Vol.2)ー定量的技術シナリオを活用した高効率シリコン系太陽電池の経済性評価ー」、2014年3月。
- [10] LCS提案書(FY2014-PP-04)、技術開発編「蓄電池システム(Vol.2)ー高容量化活物質を用いた蓄電池のコスト試算と将来展望ー」、2014年3月。

[11] 圏分裕一「高圧水素の輸送にかかわるコストとエネルギー効率」水素エネルギーシステム 34(4) 24-30 (2009).

[12] J. Chase, “Breakthroughs in Solar Powers”, Bloomberg New Energy Finance (BNEF), March 2012,
http://about.bnef.com/summit/content/uploads/sites/3/2013/11/BNEF_2012_03_19__University_Solar_Power.pdf.

2.2.3 固体高分子形燃料電池用非白金触媒の特徴と課題

【LCS 提案書番号：FY2015-PP-04】⁶⁾

自動車用燃料電池等に実用化されている固体高分子形燃料電池は低温作動で立ち下げが容易などの利点はあるものの、高価な白金を触媒に使う化学反応させる必要があり、コストや資源の面でも大きな課題がある。この問題を解決するために、非白金触媒で酸素還元触媒である鉄フタロシアニンや炭素繊維等を高温で炭化した含窒素カーボン（カーボンアロイ）や窒素ドーブカーボンなどの利用が注目されている。LCS 提案書(FY2015-PP-04)では、これらの炭素系触媒を中心とした世界的な研究の動向を明らかにし、それぞれの触媒の特徴や課題をまとめ、研究開発の方向性を示した。

(1) 非白金触媒の研究開発の動向

燃料電池の低コスト・長寿命化に向けて、白金に代わる高い酸素還元特性と安定性を有する新触媒の開発が必要不可欠であり、様々な代替触媒が研究されているが、炭素の表面には 2 電子反応しか進まないと考えられており、また酸性電解液では非常に活性が低いため、燃料電池の電極触媒として応用することは考えられなかった。しかし、近年の研究では、窒素含有炭素であるカーボンアロイ[1],[2]や窒素ドーブカーボンナノチューブが高い触媒活性を持ち 4 電子反応であると報告されている[3]。

一方で、金属や金属酸化物が重要な役割をする M-C-N (M:Fe,Co) 系触媒[4]や Ta-CNO 触媒[5]も高い活性を持つことが知られている。提案書では、これらの炭素ベースの触媒に着目し、活性サイトの種類によって、1) メタルフリー炭素系触媒と 2) 非白金金属/炭素複合触媒に大別して検討した。それぞれのタイプの触媒において代表的なものを表 2-2 と表 2-3 に示す。

⁶⁾ 本項目では、LCS 提案書(FY2015-PP-04)を中心に概説する。LCS 提案書番号については巻末を参照。

表 2-2 メタルフリー炭素系触媒の研究例

材料	作製方法	特性	性能評価
N doped Single walled CNT 文献 [7]	SiO ₂ 触媒、CVD 成長 (CH ₄ :H ₂ :NH ₃ =2:2:1) NSWCNT(直径 ~ 2.5nm)	不純物：不明 窒素含有量：3.6 at% ^{*1} Pyridinic-N (83%), Pyrrolic-N (17%)	回転電極(酸性電解液) Onset 電圧 ~0.5 V vs. Ag/AgCl (~0.7 V vs. RHE) 4 電子反応
Ar annealed defect MWCNT 文献 [6]	MWCNT の表面上に欠陥構造を形成させた後、不活性雰囲気中で加熱 (900°C, Ar) Ar900-defect MWCNT (直径 ~ 15 nm)	Fe after CV (0.0027 at%)* ² Co after CV (なし) 窒素含有量：なし	回転電極(酸性電解液) Onset 電圧 ~0.743 V vs. RHE 2 電子反応 < 発電試験(触媒量 =1.85 mg/cm ²) > OCV ^{*3} ~ 0.74V, 最大出力密度：~110 mW/cm ²
N doped CNTs 文献 [8]	アルミナテンプレートにおける N 含有ポリマーの熱分 (850°C, Ar)	不純物：不明 窒素含有量：8.4 at% ^{*1} Pyridinic-N(62%) Graphitic-N(33%) Pyrrolic-N(5%)	回転電極(酸性電解液) PMVI の熱分解試料 Onset 電圧 ~ 0.455 V vs. Ag/AgCl (~0.66 V vs. RHE)
N-doped ordered Mesoporous graphitic array 文献 [9]	シリカテンプレートにおける、N 含有芳香族 (PDI, perylenetetracarboxyl diimide) の熱分解 (600, 750, 900°C)	不純物：不明 窒素含有量：2.3 at% ^{*1} Graphitic-N (70.9%) Pyridinic-N (28.1%)	回転電極(アルカリ性電解液) PDI annealed at 900 °C, Onset 電圧 -0.13 V vs. Ag/AgCl (~0.84 V vs. RHE) 4 電子反応
N doped graphene 文献 [10]	Cu 上に N 含有芳香族を用いた CVD により作製 (400-600°C, 雰囲気：Ar+Pyridine or Julolidine) Ar+Pyridine → Pyridinic-N (90%) Ar+Julolidine → Graphitic-N(80%)	不純物：不明 窒素含有量： Pyridine-NG: 2.7 at% ^{*1} Julolidine-NG: 2.3 at% ^{*1}	回転電極(アルカリ性電解液) いずれも Onset 電圧 ~ -0.3V vs. Ag/AgCl (~0.67 V vs. RHE) Pyridinic-N = > 4 電子反応 Graphitic-N = > 2 電子反応

^{*1} at% ; atomic% .

^{*2} CV; CV 測定 (Cycle voltanmetry)

^{*3} OCV; Open Circuit Voltage (開放起電力)

ここで、特記すべきことは、メタルフリー炭素系触媒は触媒材料に金属原料が含まれていなくても、不純物が混入されている可能性がある。また、表 2-2 において、LCS 提案書(FY2015-PP-04)の提案者の研究グループによる欠陥を持つ純カーボンナノチューブ (CNT) 触媒[6]以外は全て窒素ドーピングが施されており、反応もほとんど 4 電子反応であると報告されている。

表 2-3 非白金金属/炭素複合触媒の研究例

材料	作製方法	特性	性能評価
CNT/Graphene complexes 文献 [3]	二層 CNT (double walled CNT) を用いて表面を酸化することによって作製 (酸化剤: $\text{KMnO}_4/\text{H}_2\text{SO}_4$, 65°C)	Fe before wash (0.24 at%) Fe after wash (0.03 at%) 窒素含有量: 5.3 at%	回転電極 (酸性&アルカリ性電解液) Onset 電圧 (酸性) $\sim 0.89 \text{ V vs. RHE}$ Onset 電圧 (アルカリ性) $\sim 1.05 \text{ V vs. RHE}$ 4 電子反応
Vertically aligned CNT 文献 [11],[12]	還元雰囲気 ($\text{Ar}:\text{H}_2:\text{NH}_3$) における Fe(II)Phthalocyanine の熱分解 ($800\text{--}1000^\circ\text{C}$) 基板: Quartz glass plate VACNT (直径 $\sim 20 \text{ nm}$)	不純物: 不明 窒素含有量: 2.9 at% Pyridinic-N (45%) Pyrrolic-N (15%) Graphitic-N (21%) Pyridine oxide-NO (19%)	回転電極 (酸性&アルカリ性電解液) Onset 電圧 (酸性): $\sim 0.8 \text{ V vs. RHE}$ Onset 電圧 (アルカリ性) $\sim 1.0 \text{ V vs. RHE}$ 4 電子反応 <発電試験 (触媒量 $= 0.16 \text{ mg/cm}^2$)> OCV $\sim 0.85 \text{ V}$, 最大出力密度: 320 W/g ($\sim 50 \text{ mW/cm}^2$)
PANI-M-C 文献 [4]	熱分解 (polyaniline + carbon black + 金属塩 (FeCl_3 or $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)) N_2 雰囲気, $400\text{--}1000^\circ\text{C}$	金属含有量: Fe and Co (量不明) (熱分解後、酸による金属の洗浄が行われた) 窒素含有量: 不明	回転電極と発電 (酸性電解液) Onset 電圧 $\sim 0.93 \text{ V vs. RHE}$ 4 電子反応 <発電試験 (触媒量 $= 4 \text{ mg/cm}^2$)> OCV $\sim 0.95 \text{ V}$, 最大出力密度: 550 mW/cm^2
ナノシェルカーボン (カーボンアロイ) 文献 [1]	熱分解 (furan 樹脂 + 金属錯体 (acetylacetonates & phthalocyanines based)) $600\text{--}1000^\circ\text{C}$	金属含有量: Fe and Co (量不明) 窒素含有量: 0.8 at% Pyridinic-N (25%) Pyrrolic-N (44%) Graphitic-N (24%) Pyridine oxide-NO (7%)	回転電極と発電 (酸性電解液) CoP1000 (pyrolyzed in 1000°C) Onset 電圧 (酸性) $\sim 0.8 \text{ V vs. RHE}$ <発電試験 (触媒量 $= 3.8 \text{ mg/cm}^2$)> OCV $\sim 0.78 \text{ V}$, 最大出力密度: 210 mW/cm^2
Ta-CNO 文献 [5]	(1) Ta_2CN (Tantalum carbonitride) を焼成 (Ta_2O_5 + carbon black) N_2 雰囲気, 1600°C (2) Ta_2CN を 1000°C , $\text{N}_2:\text{H}_2:\text{O}_2$ (97.5:2:0.5) 雰囲気中でアニール	金属含有量: (1) Ta: 50.1 at% (2) 不明 窒素含有量: (1) 24.5 at% (0 ~ 0.7 at%) (2) 不明 Ta-CNO の表面が炭素に被覆されており、炭素は欠陥を形成する重要な因子と説明されている。	回転電極 (酸性電解液) Onset 電圧 $\sim 0.9 \text{ V vs. RHE}$

(2) 欠陥を持つ純カーボンナノチューブ (CNT) 触媒のメカニズムと ORR(酸素還元反応)活性

燃料電池や金属 - 空気電池を含め再生可能エネルギー利用のため CNT の独特の特徴を利用する膨大な数の研究が行われている。CNT 自体は酸素還元反応(ORR)に不活性であると考えられるが、窒素ドーピングの包含と金属 - 窒素 - 炭素の錯体形成が高い ORR 活性をもたらすことが示された。LCS 提案書(FY2015-PP-04)の提案者らは、いかなる添加物、貴金属だけでなく非貴金属や窒素を含まない、純粋に CNT のみからなる代替 ORR 電極触媒の調製法を示した。そこでは、ナノチューブの外壁から中心に向けて欠陥ホールが形成される。

結論として、欠陥を持つ純 CNT 触媒においては、酸性溶液中において 2 電子反応ではあるが、メタルフリーの触媒の中で窒素ドーピングなしでも、ドーピングされた触媒より高い Onset 電圧 (0.74 V vs. RHE) が得られた。不純物が ORR に直接寄与することはありません。炭素再構築と一致する付近の欠陥ホール中の高温 CO 脱着官能基の除去が位相的欠陥をもたらし、これが高い ORR 活性の考えられる解釈であると提案している。本研究は純粋なカーボンベースの触媒の設計を通じて、高性能燃料電池の実現への道を拓くと考えている[6]。

(3) 非白金触媒の研究開発の課題

現状では実用化レベルまでに炭素系触媒を高活性化するための要因がまだわかっていない。そこで、既往研究を考察した上で考えられる課題をまとめることにした。

炭素系触媒においては様々な活性サイトが存在していると考えられるが、高活性高耐久性を実現するにはこれまでの炭素系触媒で得られた結果を基に、それぞれの触媒の類似点や相違点を整理し、メカニズムの解明と発電試験による実証が必要である。

- ①炭素触媒の高活性化の鍵は、構造制御にある。メカニズムの解明のためには様々な構造を持つ炭素触媒の構造を形成させる必要があり、酸化や窒素ドーピング（図 2-10 参照）など、炭素欠陥の形成メカニズムの解明と新規制御手法の開発が重要である。
- ②異なる触媒を比較・評価するために、回転電極による酸化還元反応電流の測定などの電気化学評価法をより確立することが重要である。
- ③その上で、触媒を用いた発電特性、耐久性の評価が不可欠である。

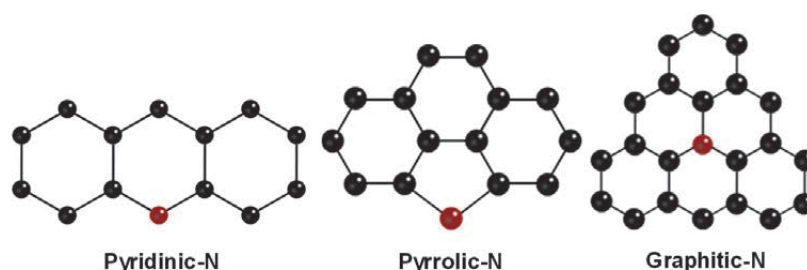


図 2-10 炭素中にある N の構造

参考文献

- [1] J. Ozaki, S. Tanifuji, A. Furuichi, and K. Yabutsuka, “Enhancement of oxygen reduction activity of nanoshell carbons by introducing nitrogen atoms from metal phthalocyanines,” *Electrochimica Acta*, vol.55, no.6, pp.1864-1871, 2010.
- [2] M. Kobayashi, H. Niwa, Y. Harada, K. Horiba, M. Oshima, H. Ofuchi, K. Terakura, T. Ikeda, Y. Koshigoe, J. Ozaki, S. Miyata, S. Ueda, Y. Yamashita, H. Yoshikawa, and K. Kobayashi, “Role of residual transitionmetal atoms in oxygen reduction reaction in cobalt phthalocyanine-based carbon cathode catalysts for polymer electrolyte fuel cell,” *Journal of Power Sources*, vol.196, no.20, pp.8346-8351, 2011.
- [3] Y. Li, W. Zhou, H. Wang, L. Xie, Y. Liang, F. Wei, J. C. Idrobo, S. J. Pennycook, and H. Dai, “An oxygen reduction electrocatalyst based on carbon nanotube-graphene complexes,” *Nature Nanotech.*, vol.7, pp.394-400, 2012.
- [4] G. Wu, K.L. More, C.M. Johnston, and P. Zelenay, “High-Performance Electrocatalysts for Oxygen Reduction Derived from Polyaniline, Iron, and Cobalt,” *Science*, vol.332, no.6028, pp.443-447, 2011.
- [5] A. Ishihara, M. Tamura, Y. Ohgi, M. Matsumoto, K. Matsuzawa, S. Mitsushima, H. Imai, and K. Ota, “Emergence of Oxygen Reduction Activity in Partially Oxidized Tantalum Carbonitrides: Roles of Deposited Carbon for Oxygen-Reduction-Reaction-Site Creation and Surface Electron Conduction,” *J. Phys. Chem. C*,

- vol.117, no.37, pp.8837-18844, 2013.
- [6] K. Waki, R.A. Wong, H.S. Oktaviano, T. Fujio, T. Nagai, K. Kimoto, and K. Yamada, “Non-nitrogen doped and non-metal oxygen reduction electrocatalysts based on carbon nanotubes: mechanism and origin of ORR activity,” *Energy Environ. Sci.*, vol.7, no.6, pp.1950-1958, 2014.
- [7] D. Yu, Q. Zhang, and L. Dai, “Highly Efficient Metal-Free Growth of Nitrogen-Doped Single-Walled Carbon Nanotubes on Plasma-Etched Substrates for Oxygen Reduction,” *J. Am. Chem. Soc.*, vol.132, no.43, pp.15127-15129, 2010.
- [8] C.V. Rao, C.R. Cabrera, and Y. Ishikawa, “In Search of the Active Site in Nitrogen-Doped Carbon Nanotube Electrodes for the Oxygen Reduction Reaction,” *J. Phys. Chem. Lett.*, vol.1, no.18, pp.2622-2627, 2010.
- [9] R. Liu, D. Wu, X. Feng, and K. Mullen, “Nitrogen-Doped Ordered Mesoporous Graphitic Arrays with High Electrocatalytic Activity for Oxygen Reduction,” *Angewandte Chemie International Edition*, vol.49, no.14, pp.2565-2569, 2010.
- [10] S. Yasuda, L. Yu, J. Kim, and K. Murakoshi, “Selective nitrogen doping in graphene for oxygen reduction reactions,” *Chem. Commun.*, vol.49, no.83, pp.9627-9629, 2013.
- [11] K. Gong, F. Du, Z. Xia, M. Durstock, and L. Dai, “Nitrogen-Doped Carbon Nanotube Arrays with High Electrocatalytic Activity for Oxygen Reduction,” *Science*, vol.323, no.5915, pp.760-764, 2009.
- [12] J. Shui, M. Wang, F. Du, and L. Dai, “N-doped carbon nanomaterials are durable catalysts for oxygen reduction reaction in acidic fuel cells,” *Science Advances*, vol.1, no.1, p.e1400129, 2015.

2.2.4 蓄電池システム

【LCS 提案書番号：FY2014-PP-04】⁷⁾

【LCS 提案書番号：FY2015-PP-02】⁷⁾

蓄電池技術は近年エネルギー転換における重要な役割を持つ技術として、各方面から高い関心が集まっている。電気自動車などの次世代自動車の駆動電源、あるいは太陽光発電や風力発電のような、変動が大きな再生可能エネルギーの電力調整電源としての重要度は更に高まっている。しかし、広範囲な普及にあたって一層の性能向上とコスト低減が課題である。より効率的な技術開発と技術普及のためには、電池性能と将来のコストと、具体的な要素技術開発との関係を定量化し、評価する必要がある。

LCS ではこれまでに現状のリチウムイオン電池を対象とした製造コストを計算し、コスト低減のため、技術的に検討した定量的技術シナリオを構築してきた。蓄電池システムに関する前 LCS 提案書[1]（平成 26 年 3 月）には、蓄電池の製造工程を詳細に分析した結果、現状（系：LiCoO₂ 正極材/黒鉛負極材、エネルギー密度：200Wh_{ST}/kg、生産規模：1GWh/y、工程収率：66%）の蓄電池製造コストが 17.6 円/Wh_{ST}（Wh_{ST}:蓄電池 1 回の充放電容量(単位:Wh), ST:Storage)であることを示し、また生産規模の拡大、収率改善、高エネルギー密度化による製造コストを試算した。

LCS 提案書[1]に続き、LCS 提案書(FY2015-PP-02)では、高容量密度が期待できる

⁷⁾ 本項目では、LCS 提案書(FY2014-PP-04)及び LCS 提案書(FY2015-PP-02)を中心に概説する。
LCS 提案書番号については巻末を参照。

新材料を用いたリチウムイオン電池について具体的に検討した。容量密度が現行より 2 倍の新材料（酸化リチウム系正極活物質）並びに容量密度が現行より 5 倍以上の新材料（シリコン系負極活物質）を用いた高容量密度リチウムイオン電池について、プロセス設計に基づき製造コストを試算した。また、電気自動車用の電池として、2030 年に 700Wh/kg 以上のエネルギー密度のある蓄電池が求められているが[2]、既存型リチウムイオン電池は、設計限界に達している。LCS 提案書(FY2015-PP-02)では、次世代二次電池の中で理論エネルギー密度が最高となるリチウム空気電池の性能及びコストについて検討した。

(1) 高容量化活物質を用いた新型リチウムイオン電池のコスト試算と将来展望

LCS 提案書(FY2014-PP-04)では、LCS 提案書[1]（平成 26 年 3 月）の続報として、特定の新規正極活物質（酸化リチウム系）と新規負極活物質（シリコン系）を組み合わせ、円筒型（18650 型）を対象として、その性能と製造コストを定量的に評価した。酸化リチウム系正極活物質とシリコン系負極活物質の採用により、製造コストは、現状の 17.6 円/Wh_{ST} から、2030 年（系：Co-doped Li₂O 正極材/SiO 負極材、エネルギー密度 430Wh_{ST}/kg、生産規模：10GWh/y、工程収率：90%）に 5.1 円/Wh_{ST} まで低減の可能性があることを示した（図 2-11 参照）。更に、製造コストの解析の結果に基づき、今後の技術開発課題（①～④）を示した。

- ① 現行の酸化リチウム系正極、シリコン系負極の性能を上げるために、正・負極共に微細構造設計、容量密度を向上する技術開発が必要である。
- ② 新たな高容量化・高電位化電極活物質の開発や探索が必要である。
- ③ 活物質以外の部材（セパレータ、電解液）の高性能化も必要である。例えば、Li に対する電位を 5V 程度まで高めることで高容量化が期待できる正極材料では、電解液の高性能化が実用化の障壁となっている。現行の電解液は高電圧に耐えられず分解してしまうため、新たな電解液の開発が必要である。また、高エネルギー密度化のため、電極の厚膜化が必要であるが、バインダーや高強度の集電材の開発が必要である。
- ④ 低コスト化のために、製造プロセスの技術革新（収率向上など）が必要である。

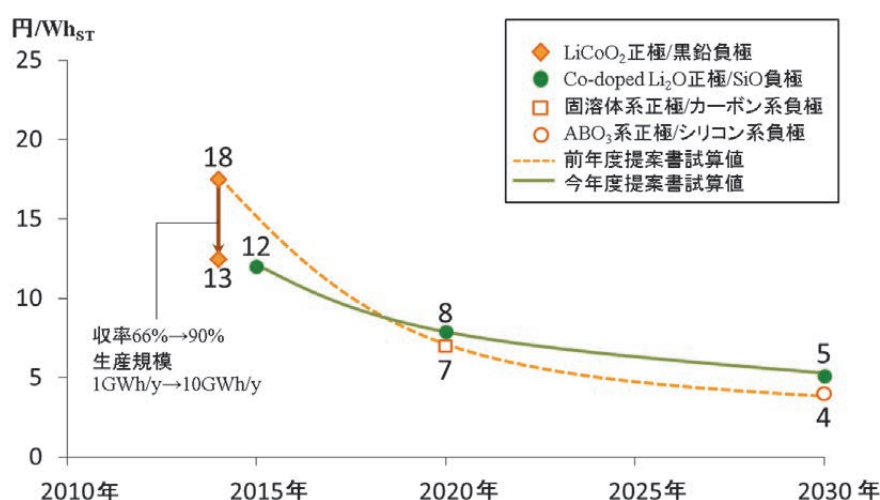


図 2-11 各蓄電池技術シナリオにおける製造コストの比較

(2) リチウム空気電池のコスト評価と技術開発課題

LCS 提案書(FY2015-PP-02)では、リチウムイオン電池より更なる高いエネルギー密度が期待されているリチウム空気電池について検討した。リチウム空気電池とは、多孔質炭素を正極、金属リチウムを負極、有機電解液を電解液とした構造であり、これらと正極側の酸素源で構成される。放電する際に、負極活物質のリチウムイオンと正極活物質の多孔質炭素を透過する酸素が反応して過酸化リチウム (Li_2O_2) を生成することで電力を得る。充電は逆反応である。リチウム・グラフェンを負極活物質とし、酸化ルテニウム (RuO_2) ナノ粒子触媒を微細な空孔に有するグラフェンを正極活物質とした[3]。セパレータとして、負極に使用されるリチウムの酸化を防ぎ、空気と水を遮断し、リチウムイオンのみ伝導するセラミックセパレータシートを採用した。

10KWh の定置型 (ラミネートタイプ) 電池システムの設計と性能及びコスト評価を行った。電極材として、リチウム・グラフェン負極と実験結果で報告されている容量密度 2000mAh/g の多孔質グラフェン正極[3]を用いた。電極シート 1 枚 (両面塗布) の構造は、図 2-12 参照。14 枚の電極セルを重ねて 1 個のラミネートセルをつくり、5 個のラミネートセルを組み合わせると 10KWh の定置型システムとする。評価結果により、リチウム空気電池のシステムエネルギー密度は 180Wh_{ST}/kg (セルエネルギー密度 : 605Wh_{ST}/kg) であり、システム製造コストは 28 円/Wh_{ST}となった。

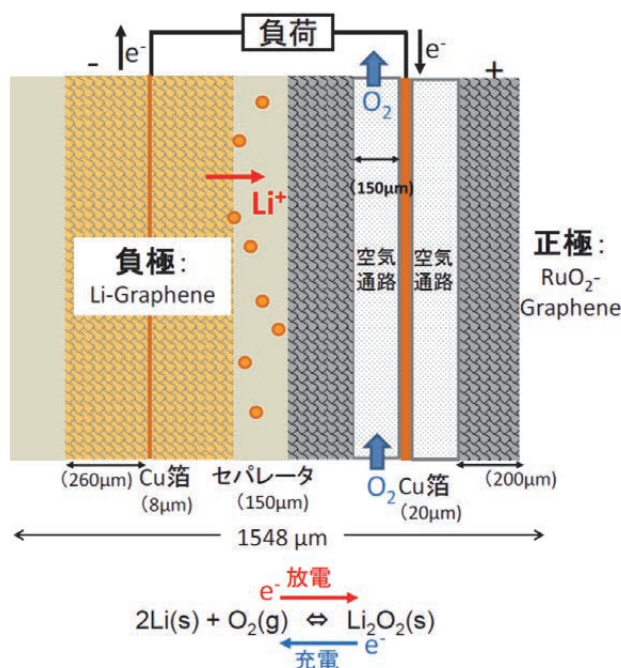


図 2-12 電極シート（シートサイズ：250mm×250mm×1,548μm、2 面塗布）の構造と動作原理（ここで、空気通路以外は電解液で満たされている）

今後の課題として以下を提案することができる。

- ① 本試算によると、リチウム空気電池のセルエネルギー密度は、現状 605Wh_{ST}/kg に留まっている。充放電反応において安定性が低いことが原因である。正極、負極材料の研究開発により、セルエネルギー密度を 700Wh_{ST}/kg 以上に増大させる

ことが必要である。

- ②本報告のリチウム空気電池の製造コストは、正極材料で使われる触媒の原材料費が高いため、リチウムイオン電池より 1.6 倍程度高価である。コスト低減のためには、低価格で高性能な触媒の開発が必要である。
- ③電極材料等の基礎研究だけでなく、この蓄電システムの効率的稼動のための周辺機器の開発も必要である。

参考文献

- [1] LCS提案書(FY2013-PP-03)、技術開発編「蓄電池システム—要素技術の構造化に基づく定量的技術シナリオと科学・技術ロードマップ」、平成26年3月。
- [2] NEDO二次電池技術開発ロードマップ2013 (Battery RM2013), 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO), 平成25年8月。
- [3] Xianwei Guo, Pan Liu, Jiuhui Han, Yoshikazu Ito, Akihiko Hirata, Takashi Fujita, and Mingwei Chen, “3D Nanoporous Nitrogen-Doped Graphene with Encapsulated RuO₂ Nanoparticles for Li-O₂ Batteries”, Advanced Materials, 27(40), 2015, p.6137-6143.

2.3 エネルギー供給源の多様化に向けた研究開発課題

定量的技術システム研究にて、太陽電池や蓄電池、燃料電池、バイオマス、風力発電、中小水力発電、地熱発電、CCS 等の低炭素技術の研究開発目標と研究開発課題を提示し、低炭素技術を組み込んだ個別エネルギーシステム（例：CCS、蓄エネルギー、将来的な水素の役割等）、電力等エネルギーシステムの一環として評価、エネルギーシステム全体について、コストや CO₂ 削減効果、環境性等の将来見通しを定量的に示すとともに、不断に最新のデータを取り込んで「最新の課題」を明確にすることに留意している。

東日本大震災以降、エネルギー安定的利用の確立に向けてエネルギー供給源の多様化が検討されている。太陽光発電の他、水力や食品残渣等有機廃棄物、森林資源、風力、地熱などもエネルギー供給源として期待されており、国や地方自治体はそれらを利用した分散型エネルギーシステムの実証事業を行っている。ここでは、中小水力発電、地熱発電、木質バイオマス、及びバイオガス廃棄物のメタン発酵について、現時点までの検討結果の概要を示す。

2.3.1 中小水力発電－開発可能な発電電力量と発電原価、設備利用率との関係－

【LCS 提案書番号：FY2014-PP-06】⁸⁾

水力発電は他の再生可能エネルギーに比べて供給安定性に優れ、設備利用率も高い利点がある反面、電気関係工事費及び土木工事費等の建設費初期投資が大きいため普及を難しくしている。我が国では、その発電設備容量は既設が約 2000 万 kW（揚水発電を除く）、未開発賦存量が約 900 万 kW とされている[1]。比較的投資効率の良い大規模なダム建設を伴う発電地点はほぼ開発済みであり、今後の開発可能な地点は、主に河川を利用した概ね発電出力 3 万 kW 以下の中小規模の流れ込み式発電所（中小水力発電）である。

中小水力発電候補地は、その発電能力が水量と落差といった地点固有の制約に依存する反面、全国に広く分布しており、普及が進めば他の再生可能エネルギーとも併用した分散型エネルギー源としても有望である。LCS 提案書(FY2014-PP-06)は、中小水力発電の普及促進のあり方について、未開発賦存量の適切な把握や、建設費のコストダウンの可能性を中心に提案するものである。中小水力発電では、各々の発電出力は小規模であり、例えば 200kW 程度の規模の発電所では、現状の発電原価が 40 円/kWh 前後となり、普及のためには 1/3 程度にコストダウンを行う必要がある。建設費は電気関係工事費と土木工事費に大別されるが、候補地が約 2 万地点と多いことから、いずれも標準化と量産化によるコストダウンが期待できる。着手段階の取り組みについてまとめた前 LCS 提案書[2]では、水車、発電機等の電気関係工事費について、材料費率の分析から標準化により 1/3 程度にできる可能性を示した。LCS 提案書(FY2014-PP-06)では土木工事費に対して、①100m 以下の有効落差で使用可能で安価な FRPM 管の採用など適切な素材を使用する、及び、②量産により一般の土木工事標準単価を適用する、というコストダウン方法を採用し、建設工事費全体を計算した。その結果、発電原価を現在の 1/3 程度の 15 円/kWh 以下にできた。

また、環境省の調査結果においては、設備利用率 60%を一定として全国の年間発電電力量が約 47TWh と試算されているが、発電原価 15 円/kWh 以下の条件の下で、最大使用水量を多くし、最大出力を増すことで、設備利用率は平均約 40%に下がる

⁸⁾ 本項目では、LCS 提案書(FY2014-PP-06)を中心に概説する。LCS 提案書番号については巻末を参照。

が、全国の年間発電電力量は約 22%増加して約 58TWh となった。

今後は各地点固有の条件を把握し、適切な開発条件、工事方法などを検討した上で普及に向けた提案を行う。

参考文献

- [1] 「平成23年度再生可能エネルギーに関するゾーニング基礎情報整備報告書」、環境省、平成24年6月。
- [2] LCS提案書(FY2013-PP-06)、技術開発編「中小水力発電－要素技術の構造化に基づく定量的技術シナリオと科学・技術ロードマップ（着手段階）－」、平成26年3月。

2.3.2 地熱発電－高温岩体発電の発電コスト試算－

【LCS 提案書番号：FY2015-PP-05】⁹⁾

地熱は、温泉など古くから利用されており、1966年に松川地熱発電所が稼働して以来、発電容量約 500MW の地熱発電が開発されてきたが、地熱資源の活用は十分とは言えない。日本の地熱導入ポテンシャル（150℃以上）は、約 14GW と推計されており[1]、地熱開発を促進するとともに、従来技術の活用によって発電出力を増大させることは可能である。

地熱発電の種類は、資源深さが浅い順に温泉発電、熱水系地熱発電、高温岩体発電、マグマ発電に分けることができる。温泉発電と熱水系地熱発電は実用化され、現在多くの開発プロジェクトが進行している。マグマ発電は研究段階である。

一方、大きな賦存量を持つ高温岩体発電について、日本では NEDO（山形県肘折）[2]と電力中央研究所（秋田県雄勝）[3]による実証試験が行われ、基本的な技術は確立されているにも関わらず、未だ実用化されていない。高温岩体発電を推進するため、その発電コストを明らかにする。LCS 提案書(FY2015-PP-05)では、開発有望地点（A：岩手県葛根田地域、及び B：秋田県皆瀬地域の 2 地点）での河川から取水できる量を算出し、これを平均深度 3,000m、平均温度 300℃の高温岩体に注入して得られる熱水を用いて、地上設備をシングルフラッシュ式とした場合の、高温岩体発電所（図 2-13 参照）における発電出力と発電コストを計算した。結果を表 2-4 に示す。

発電出力は取水量に比例して増加し、発電出力 1GW に必要な取水量は 2.4m³/s（0.76 億 m³/年）となる結果が得られた。これより、全国年間発電電力量の 20%を高温岩体発電 30GW で発電するのに必要な水量は 23 億 m³/年となる。一方、全国河川水量 2,400 億 m³/年[4]から農業用水、工業用水、生活用水を除くと[5]、残る利用可能な河川水量は 1,680 億 m³/年であり、上記の水量を河川から確保できると結論できる。

高温岩体発電の発電コストは、水回収率を 98%までに高めると、公開されているデータを基に計算した熱水系地熱発電の発電コストとほぼ等しくなる。

⁹⁾ 本項目では、LCS 提案書(FY2015-PP-05)を中心に概説する。LCS 提案書番号については巻末を参照。

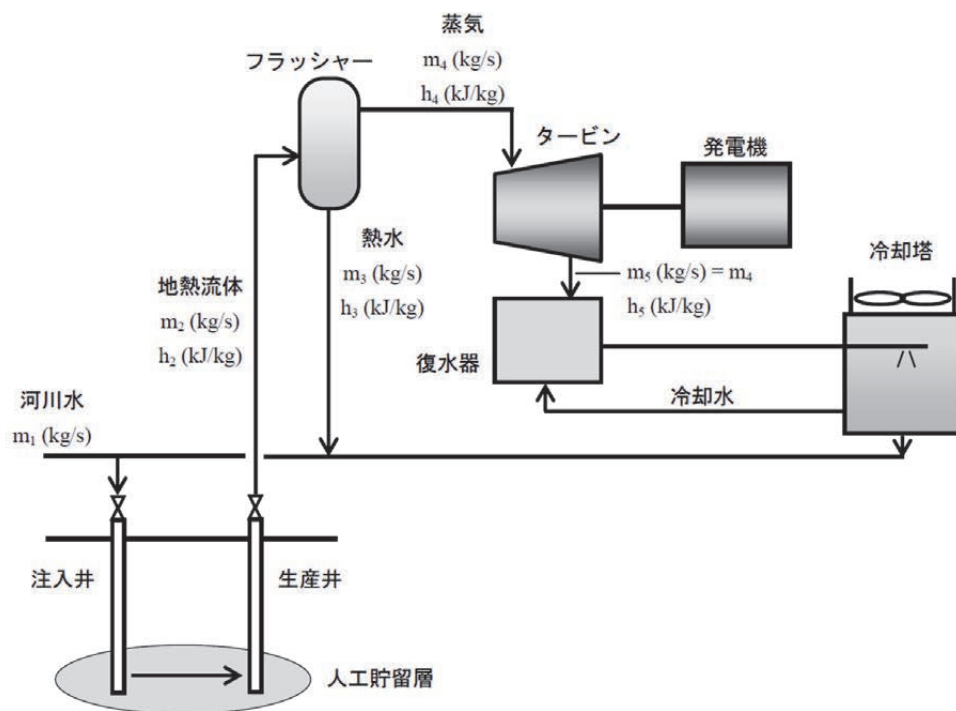


図 2-13 高温岩体発電とシングルフラッシュ式の組合せ

表 2-4 高温岩体発電の発電コスト

地点	A		B	
河川水量（取水可能量）	1,400t/h (0.4m ³ /s)		5,600t/h (1.6m ³ /s)	
水回収率 R	50%	98%	50%	98%
貯留層温度	280℃	280℃	280℃	280℃
発電出力	38MW	157MW	155MW	650MW
発電効率 η	16%	16%	16%	16%
注水井の本数	1 本	7 本	7 本	38 本
生産井の本数	4 本	14 本	14 本	52 本
建設費	185 億円	573 億円	592 億円	2280 億円
建設単価	50 万円/kW	37 万円/kW	38 万円/kW	35 万円/kW
発電コスト	10.9 円/kWh	7.3 円/kWh	8.5 円/kWh	7.0 円/kWh

参考文献

- [1] 平成25年度地熱発電に係る導入ポテンシャル精密調査・分析委託業務報告書、環境省。
- [2] 川崎耕一、菊池恒夫、及川寧己、高温岩体発電システムの開発－NEDO肘折プロジェクト、地熱、39巻、3号、pp23-37、2002。
- [3] 海江田編、電中研レビュー第49号、未利用地熱資源の開発に向けて－高温岩体発電への取組、電力中央研究所、2003。
- [4] 日本河川協会、http://www.japanriver.or.jp/river_law/map.htm。
- [5] 国土交通省水資源部、日本の水資源、平成26年版。

2.3.3 林業の活性化を通じた地域における低炭素社会の実現－林業素材生産コストの機械化推進による低減効果－

【LCS 提案書番号：FY2014-PP-09】¹⁰⁾

【LCS 提案書番号：FY2015-PP-06】¹⁰⁾

国土の約 66%^[1]が森林を占める我が国において、木質バイオマスは豊富かつ地域的偏在の少ないカーボンニュートラルなエネルギー資源として、高いポテンシャルを有している。また再生可能エネルギーの固定価格買取制度をはじめとした政策的な後押しもあり、燃料用木材チップや木質ペレットなどの木質バイオマスのエネルギーとしての需要が増加している。しかし、現在、我が国の木質バイオマス発電の燃料は、未利用間伐材、建設資材廃棄物、一般木材残渣等であるが、これらを使ったバイオマス発電の既導入量はまだ少なく、約 4TWh/年に留まっている^[2]。現在は、建設資材廃棄物及び一般木材残渣が木質燃料の主流であるが、今後増える可能性は小さい。一方、日本の森林資源の蓄積は 50 億 m^3 ^[1]以上あるにもかかわらず、未利用間伐材はほとんど使われていない。仮に 1 億 m^3 /年を発電燃料に利用できるとすると、年間発電電力量約 60TWh の高い発電ポテンシャルを有していることになるが、現状では植林から伐採までの木材生産総コストが高く、エネルギーとして利用するには大幅なコストダウンが必要である。国際的なエネルギーコストの競争を考慮すると、日本の木材生産総コストは従来の 1/5 程度にすることが求められる（図 2-14 参照）。

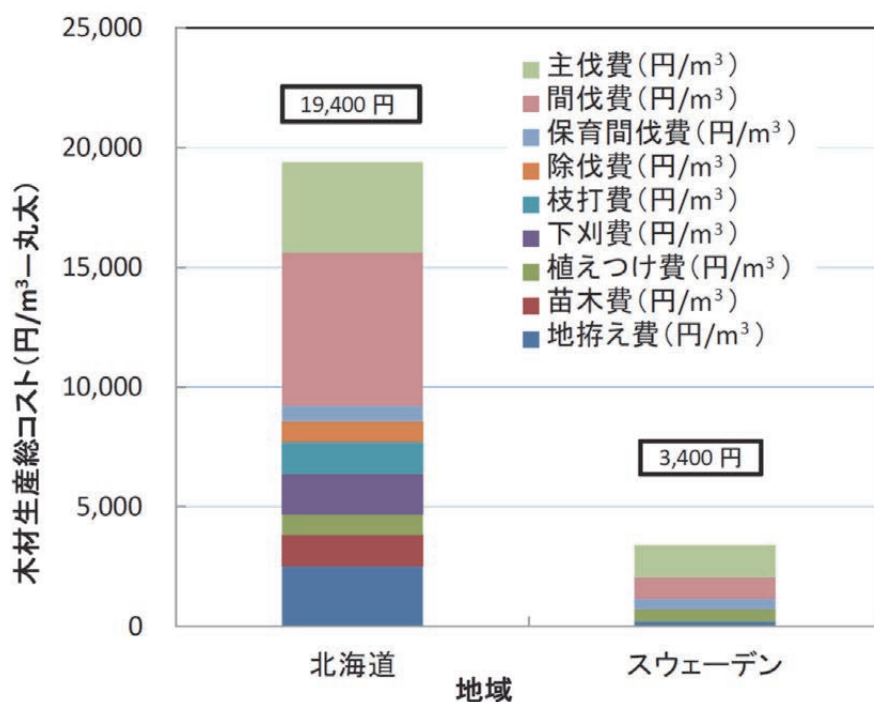


図 2-14 北海道とスウェーデンのコスト構造比較

木質バイオマスが豊富にある農山村地域を対象に林業を活性化させ、その資源を十分に活用するためには、木質バイオマスのエネルギー利用に関し、図 2-15 に示す

¹⁰⁾本項目では、LCS 提案書(FY2014-PP-09)及び LCS 提案書(FY2015-PP-06)を中心に概説する。
 LCS 提案書番号については巻末を参照。

ような木質バイオマス利活用地域全体概要に基づいて、(1) 森林生産から利用までの各プロセスにおける経済性と環境性を把握すること、(2) 高効率・低コスト化の鍵となる技術的課題を抽出すること、(3) 森林の造林から利用まで一貫した経済合理性のある自律分散型の木質バイオマスのエネルギー利用プロセス設計を行うことが必要である。

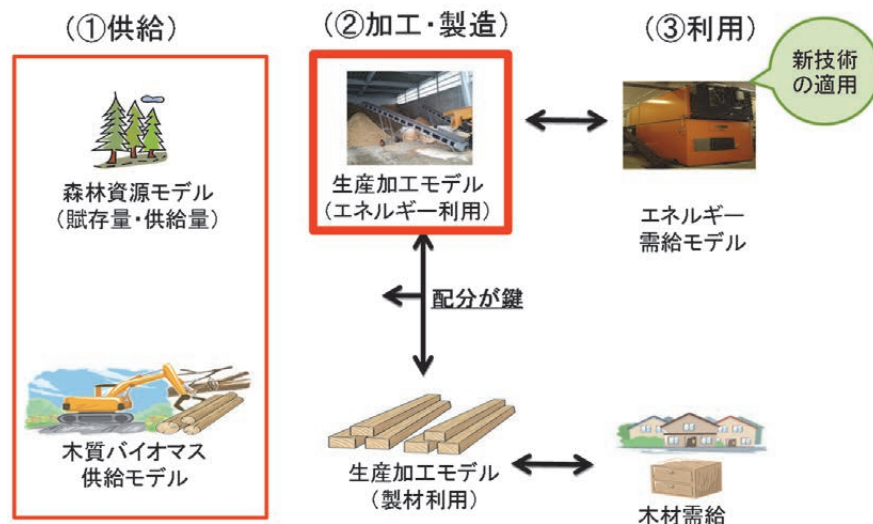


図 2-15 木質バイオマス利活用地域モデル全体概要

LCS 提案書(FY2015-PP-06)では、その一環として、森林傾斜角 20°以下の緩斜面における機械化の推進による主伐費の削減、及び持続可能な単位事業量(1 万 ha/50 年程度の森林面積)の確保による、国際的コストと同程度のコスト(主伐費 1,500 円/m³程度)へのコストダウンの可能性を示す。

今後は、植林など育林費用低減の検討、最近開発が進む傾斜角 30°以上の急峻な地形に適した林業機械の検討に加え、地域に適した作業システムを提言していく。また、林業の持続的な運営には、1 万 ha 単位程度の施業の集約化や、継続的な木材の需給システムの確立も必要であり、日本の林業改善への包括的な検討を行っていく。

参考文献

- [1] 「平成27年版 森林・林業白書」、林野庁、平成27年6月。
- [2] 「再生可能エネルギー各電源の導入の動向について」、総合資源エネルギー調査会、長期エネルギー需給見通し小委員会(第4回会合)資料2、資源エネルギー庁、平成27年3月。

2.3.4 バイオマス廃棄物のメタン発酵－反応解析によるプロセス合理化の検討－

【LCS 提案書番号：FY2015-PP-07】¹¹⁾

下水汚泥、食品残渣等の廃棄物は貴重なバイオマス資源であり、エネルギーとして利活用するプロセスは低炭素化に有効であるが、現状では高コストが普及の妨げになっている。バイオガス製造コストを低減するためには、メタン収率を向上させて投入材料から得られるメタンを増加させるか、滞留時間の短縮によって製造コストの大きな割合を占める発酵槽の設備費・用役費を低減させる必要がある。

廃棄物の嫌気性メタン発酵によるバイオガス製造プロセスの合理化を検討するために、嫌気性発酵の厳密な反応解析を実行し、バイオガス製造コストの低減につながるメタン収率の向上や滞留時間の短縮に有効なパラメータを明らかにした。それらの結果を基にバイオガス製造コストを低減する手法を検討し、反応シミュレータを作成した。有機物の嫌気性発酵反応は図 2-16 に示すように、微細化、加水分解、酸・酢酸生成、メタン生成の各過程からなる。

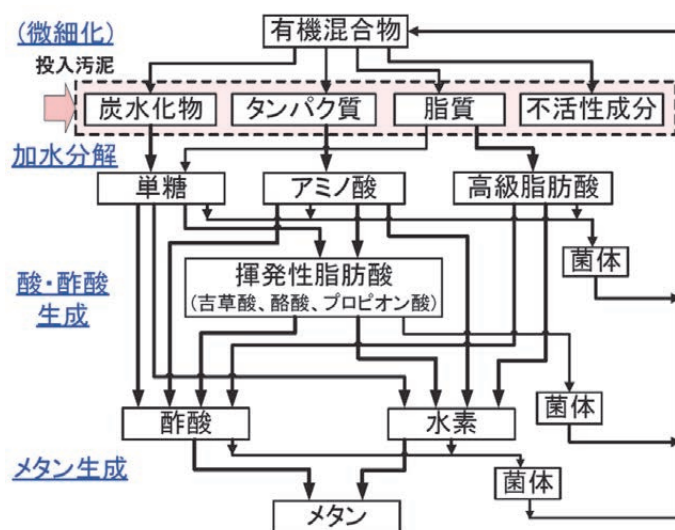


図 2-16 メタン発酵反応の概要（有機成分のみ）

不活性成分は可溶性と不溶性の 2 成分を含む

反応モデルは国際水協会（International Water Association:IWA）による嫌気性消化モデル"ADM1"[1]を基にしており、実操業データによる較正と検証を行った。横浜市での実績値[2],[3]を再現する投入汚泥を、標準ケース（固形分(TS)濃度：5wt%、VS(固形分 TS 中の有機成分)/TS：0.75、VS 成分中不活性成分(COD)：0.23）とした。このモデルを用いた反応解析によって、メタン収率の向上には加水分解の促進（図 2-17 参照）と不活性成分の削減と消化汚泥（固形分）の一部リサイクルが有効であり、滞留時間の短縮には酢酸からメタンを生成する反応の促進と、投入材料の組成の調整（タンパク質比、無機窒素・炭素濃度の増加）が有効であることがわかった。

¹¹⁾本項目では、LCS 提案書(FY2015-PP-07)を中心に概説する。LCS 提案書番号については巻末を参照。

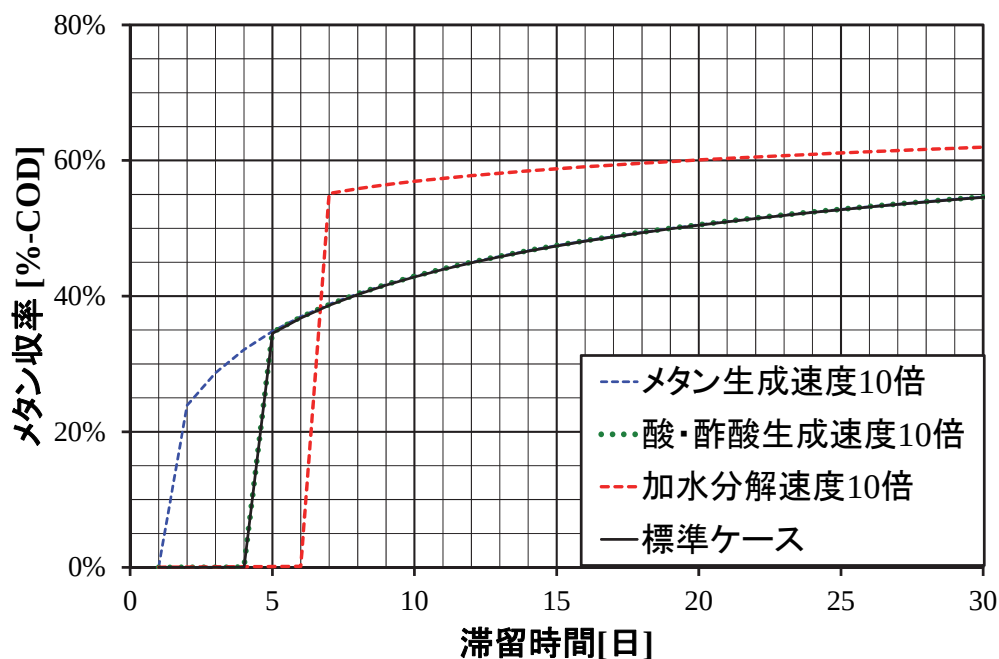


図 2-17 各過程の反応速度定数を標準ケースに対して増大させた場合のメタン収率

反応解析を適用したプロセス設計を行うことができ、合理化技術の評価が可能となる。例えばメタン発酵槽の直前（図 2-18 参照）に、ビーズミル粉碎処理を行い、表面積の増加と細胞膜の破砕などを期待する。加水分解過程の反応速度が 10 倍促進され、不活性成分が半減すれば、滞留時間 10 日で標準ケースの滞留時間 20 日より 28% 高いメタン収率を期待できる。実験による検証が必要であるが、例えば標準ケースでのバイオガス製造コスト 3.3 円/MJ に比べ、21% 程度削減の可能性がある。

そのほかに消化汚泥（固形分）の一部リサイクルによるバイオガス製造コストを低減できることがわかった。発酵槽から出力される消化汚泥を濃縮器で濃縮し、その一部を再び発酵槽へ投入する。

今後、加水分解速度の促進や難分解性の不活性成分の減少に効果があり、コスト削減に有効な前処理技術の開発と高温条件での反応解析が必要である。

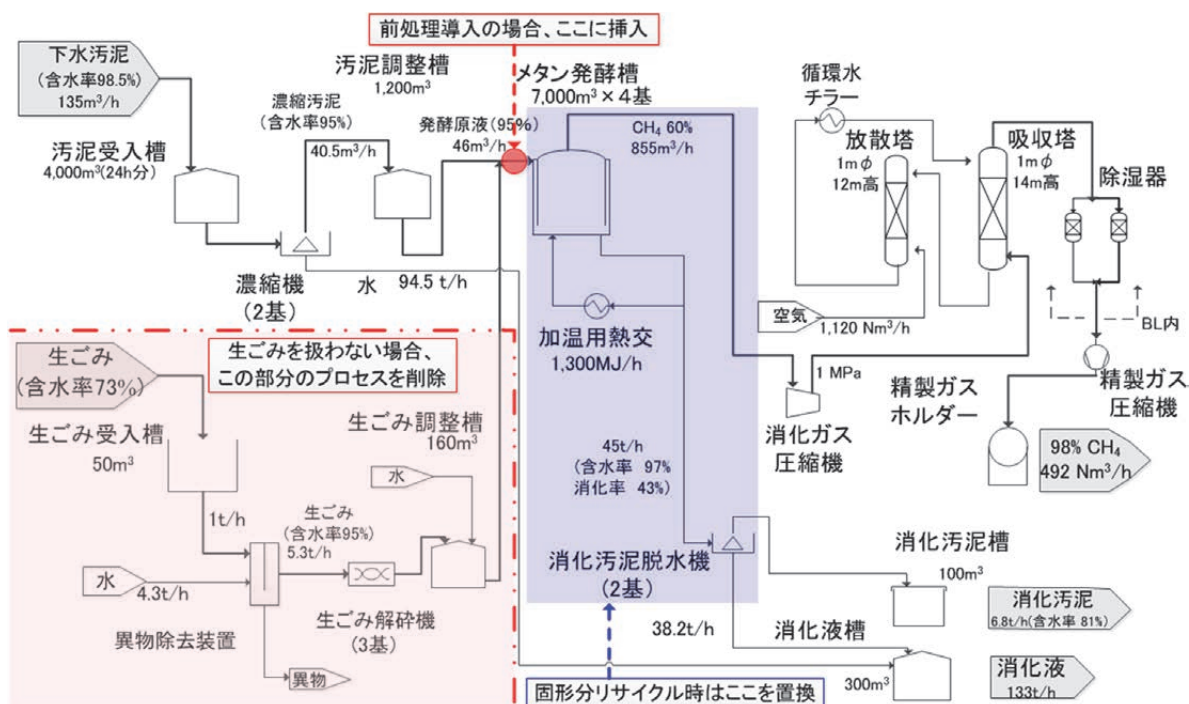


図 2-18 バイオガス製造プロセス

下水汚泥のみを発酵させる場合は桃塗り部分のプロセスを削除、前処理を導入する場合は赤丸部分に設備を挿入、固形分リサイクルを導入する場合は青塗り部分を置き換える

参考文献

- [1] Batstone, Damien J., et al. Anaerobic digestion model no.1 (ADM1), IWA publishing, 2002.
- [2] メタン発酵. 技報堂出版, 2009.
- [3] 藤田剛, "汚泥の有効利用と消化ガス発電の現状 (特集 地球温暖化防止対策に向けた取り組み)," 下水道協会誌=Journal of Japan Sewage Works Association 51.622 (2014), 11-15.

2.4 低炭素型エネルギーシステムに関連した重要技術の評価

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。LCSは定量的技術システム研究の推進にあたり、エネルギー供給側（再生可能エネルギーの利用、発電効率の向上等）と需要側（省エネ・節電、リサイクルの活用等）の双方の技術に着目し、低炭素技術の現状について俯瞰的総合的な検討を行ってきた。これまで検討してきた太陽電池、蓄電池、燃料電池、バイオマス、風力発電、中小水力発電、地熱発電等の低炭素技術の研究開発目標と研究開発課題を提示し、低炭素技術の電力等エネルギーシステムの一環として評価を進めている。

本項では、低炭素型エネルギーシステムに関連した重要技術（CCS（二酸化炭素回収貯留）、将来的な水素の役割）について、CO₂削減効果、環境性等の将来見通しを定量的に示す。

2.4.1 CCS（二酸化炭素回収貯留）の概要と展望－CO₂分離回収技術の評価と課題

【LCS 提案書番号：FY2015-PP-08】¹²⁾

化石燃料源電力の低炭素化のために、発電所排ガスから CO₂ を分離回収して地中内部に貯留する方法がある。

CO₂ の分離回収方法として、燃料をボイラーで燃焼し、除塵・脱硫処理した後に、CO₂ を分離回収する Post-Combustion 方式と、燃料を約 1,300℃、5MPa の高温高压下で O₂ を用いてガス化し、洗浄・水性ガスシフト反応 ($\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + \text{CO}_2$)・脱硫処理した後に CO₂ を分離回収する Pre-Combustion 方式がある。Post-Combustion 方式には、常圧近傍で分離回収できるアミンによる化学吸収法、Pre-Combustion 方式には高压下で分離回収できる Selexol 液 (dimethyle ether of polyethylene glycol) などによる物理吸収法がある。

今回化学吸収法と物理吸収法についてプロセスを検討し、CO₂ の分離回収コストを評価した。検討した範囲は、脱硫処理後 CO₂ の液化までとし、貯槽輸送注入コストは含んでいない。

CO₂ 分離回収コストは、化学(アミン)吸収法では 4.1¥/kg、物理吸収法では 3.9¥/kg となり、物理吸収法のほうが若干安い。前者はアミンから CO₂ を分離する為に必要な分離エネルギーコストが 0.8¥/kg と高く、後者は高压のための設備費用と多量の吸収液を取り扱うための電力コストが 2.5¥/kg と高い。

発生電力量当たりの CO₂ 回収量を 0.7kg/kWh とすると、今回の検討の範囲で発生電力量当たり約 2.8¥/kWh のコストが電力コストに上積みされる。現状では将来の再生可能エネルギー発電との競争は厳しい。今後、貯留輸送注入工程の検討と膜分離法などの評価を行う。

2.4.2 将来的な水素の役割－低炭素排出水素の経済性と CO₂ 排出量－

【LCS ハンドブック 2015、p28-29】

変動する再生可能エネルギーのバッファー「エネルギーキャリア」としての水素への期待は大きい。「将来的な水素の役割はどうか」は非常に大きな関心事である。水素社会の将来の姿について、最終利活用段階での低炭素排出という観点からの、利用先や最終利用者への供給方法などの議論がなされているが、低炭素排出型原料水素製造の評価も必要である。いくつかの低炭素排出型水素製造プロセスの経済性と CO₂ 排出量について、エネルギー輸送手段を含めて検討した。現状のガソリンコスト (1.5 円/MJ：税抜き製油所渡し) に比べ、いずれも高いことがわかった。ただし、ガソリンの場合、CO₂ 排出量は、80g-CO₂/MJ である。

- ①フレアガス原料からの水素の場合、液体水素に比べ、MCH ケースが CO₂ 排出とコストの両面で優位である。
- ②電解プロセスを用いた水素製造は、現時点では、他の方法に比べ、コストが高い。
- ③バイオマスガス化水素製造プロセスは、製造コスト構成を見ると変動費、特にバイオマス原料費の影響が大きいことがわかる。国内林業の技術システムの国際水準への向上に伴い、CO₂ 排出量とコストの優位性が実現できる。
- ④エネルギーを最終利活用する地点での効率やコストが重要であり、輸送・貯蔵形

¹²⁾本項目では、LCS 提案書(FY2015-PP-08)を中心に概説する。LCS 提案書番号については巻末を参照。

態の合理的な選択が求められている。特に、将来の電源構成の中で、水素燃料発電の役割も考える必要がある。今後、いくつかの物流方式について、エネルギー効率やコストの観点から整理検討を行う。

2.5 低炭素社会実現に向けたデータ活用型材料研究（マテリアルズ・インフォマティクス）

【LCS 提案書番号：FY2015-PP-09】¹³⁾

LCS は、低炭素社会構築という世界的な重要課題の達成に向けて、必要な技術の見定めと社会実装を総合的・定量的に検討するという、特徴的なミッションを有する研究センターである。これまでに LCS では、社会課題の把握・分析から、それを因子分解して、要素技術課題までに落としこむ活動、いわゆるバックキャスティングが行われてきており、知見が蓄積されている。

こうしたバックキャスティングの観点から見たときに、最近急速に注目を集めているマテリアルズ・インフォマティクスの名で知られる研究領域が重要な位置づけを占めており、このことについて、以降で述べていきたい。

2.5.1 データ活用型材料研究

マテリアルズ・インフォマティクスは、現代の新興分野の一つであることから、その活動内容については未だはっきりとしていないところも多いが、コンセプトレベルでは、情報科学の考え方を物質科学・材料工学の分野に適用する学術領域を指す。コンピュータを用いた高速計算・自動計算を背景とする情報科学の手法が材料研究と融合することで、物質の発見、新たな材料の開発、適材適所の促進、それらを礎としたより効率的な材料の利活用が期待されている。そうした効率的な利活用の一つの具体的な形は、開発から社会実装までの期間短縮である。米国の国家プロジェクトである Materials Genome Initiative を始めとして、この学術領域と関係の深い研究プロジェクトでは、材料開発期間の短縮を明確に謳うものが多い。

よく言われるように、材料の開発には長い時間がかかり、研究段階から実際の社会実装までに数 10 年かかることも珍しくない。その主たる原因は、望みの特性を呈する材料を安定に得るまでの、典型的な試行錯誤と工程戻りにある。こうしたことから、ただ闇雲に試行錯誤を繰り返すのではなく、開発対象において現実に起こっていることを認識し、モデル化し、得られたモデルを用いて結果を予測しながらそれぞれ「設計」「シミュレーション」「改善」を繰り返して、工程戻りを低減させる「予測モデル」の活用が従来から行われてきた。こうした「予測」の方法論をいかに革新していくかが、材料開発の期間短縮に向けた一つの鍵であり、マテリアルズ・インフォマティクスに期待が集まる点である。

さて、材料研究における情報科学の知見を導入するという考え方の背景には、コンピュータを用いた高速計算・自動計算が存在することは言うまでもない。従って、マテリアルズ・インフォマティクスを進めるためには、情報科学の知見を適用できるようなコンピュータで処理が可能な「整理されたデータ群」を整備することが不可欠である。LCS では、コンセプトレベルからもう一步踏み込んで、この分野における具体的な活動を見定めるべく、材料研究分野における「データ活用」に注目し

¹³⁾ 本項目では、LCS 提案書(FY2015-PP-09)を中心に概説する。LCS 提案書番号については巻末を参照。

た。すなわち、材料研究において従来から行われているデータ活用の現状を確認し、コンピュータによる高速計算・自動計算を背景においた情報科学により、そうしたデータ活用がどのように変革されていくのかを考えることにより、マテリアルズ・インフォマティクス具体的な姿が浮かび上がると考えた。その結果として提唱したのが、「データベース」「計測・分析」「予測モデル」が三位一体的に運用され、それらの間で効果的なデータハンドリングが行われる「データ活用型材料研究」である。同時に、その具体的な活動項目として以下を見定めた。

- 1) 検証・評価： モデルの予測値と現実の値の比較
- 2) 予測モデル最適化： 現実の値から、予測モデルを改良
- 3) ファクト統合： 自動化・機械化による測定条件やワークフローの標準化、異なる特徴量を同じ瞬間に観測するマルチプローブ同時観測及びその動的観測、異なるサンプルに対してまとめて計測・分析・合成を行うコンビナトリアル手法、データの記述法（フォーマット）の標準化
- 4) データ駆動型モデリング： データベースに蓄えられたデータの傾向を、情報統計学等の知見を用いて分析し、予測モデルを確立する
- 5) ハイスループットスクリーニング： 広大な材料研究のデータ空間について、コンピュータの検索技術を用いて、複雑な条件の中から望みのデータを探し出す、あらかじめ予測モデルに基づく様々な条件に対する計算を蓄積しておくなどの工夫

インフォマティクスの単語は、コンピュータやシミュレーションをまず想起させ、マテリアルズ・インフォマティクスにおいても、特に我が国では、シミュレーションによる予測への期待が先行している印象が強い。しかしながら、インフォマティクスにはデータの生成・蓄積は不可欠なのであり、1)－5)を見ても明らかなように、計測・分析の果たす役割は本質的である。むしろ1)－5)の内容を踏まえたときに、データ活用を容易にするような新たな計測・分析手法の開発の必要性が高まっているとも考えられる。

そして、データ活用型材料研究は、上述1)－5)を見ても明らかなように、予測モデルの革新をもたらし、ひいては、材料開発を加速させることができる。

2.5.2 データ活用型研究のコンセプト拡張

次に、革新が期待される予測モデルの使われ方を考察し、データ活用型材料研究のコンセプト拡張について議論したい。

予測については、大きく分けて二つに分類することができる。一つは、過去のデータや実績に基づいて、その上に少しずつ物事を積み上げていく方法で将来を予測することであり、フォアキャストと呼ばれる。これまで述べてきた「予測モデル」というのは、フォアキャストモデルを指している。もう一つは、バックキャストと呼ばれるもので、将来を予測する際に、まず、予測対象の目標としての姿を想定し、その姿から現在を振り返って今何をすればいいかを考えるやり方である。材料研究開発の場面で考えれば、望みの特性を呈するような構造を予測する、更には、その構造を生み出せるような創製プロセスと条件を予測することがバックキャストイングにあたり、もしそのようなことができたなら、材料開発に大きなインパクトを与えることは必至である。

しかし、実際には、このように目標から条件を予測するような逆予測は困難を極

める。今の段階では、バックキャストを定量的に行うのであれば、様々な条件に対してフォアキャストモデルを用いた予測を行い、目標とする将来像を満たすような条件を見出すのが一般的である。先の材料研究の例で言えば、創製プロセス→構造→特性の予測モデル連関に基づき、様々な条件で予測を行うことで、望みの特性を呈する構造や創製プロセスを見出すことになる。

ここで注意したいのは、創製プロセス→構造→特性の予測の連鎖の先には、「部材の性能」という要素があり、その部材によって構成される「システムの動作」という要素が存在するということである。更に、そのシステムが社会の何らかのニーズを満たすものと考えれば、創製プロセスから社会ニーズに至る予測連鎖の道筋が存在し、それは、社会ニーズから材料創製プロセスにバックキャストする道筋となる。ここから、データ活用型材料研究のコンセプトを、創製プロセス→構造→特性の予測だけにとどまらず、部材→システム→社会ニーズに至るまでに拡張したならば、材料開発段階において、その材料が用いられる場面、具体的には、社会ニーズや開発材料の適用箇所を踏まえて効率的に進めることが期待される。

コンセプト拡張は、扱うデータの範囲を、材料の「創製プロセス→構造→特性」だけに留めず、それを「部材→システム→社会ニーズ」にまで拡張することから始まる。そうした取り組みの第一歩として、低炭素社会構築に資する材料の開発で用いられるデータ空間構造を、国立研究開発法人物質・材料研究機構（以下、NIMS）が編纂したハンドブックと LCS の「社会シナリオ第 2 版」を用いて試行的に概観した（図 2-19 参照）。データ空間は、①材料特性の利用先、②制御したい材料特性、③材料特性の支配因子、の 3 軸で整理可能であり、また、機能材料・構造材料の分類を超えて取り扱うデータ種の関係性を統一的に記述することが可能である。①の適用先に依らず、②制御したい特性を司る③支配因子は共通性が高く、③に関するデータ統合と蓄積と、①－③の相関関係をインフォマティクス手法等により分析することで、思いもよらぬ知見をもたらす可能性を示している。一方で、「②制御すべき特性」について、材料を使う立場からも活用しやすい記述方法について検討の余地があり、「制御すべき特性」が技術の「使用」に結びつけやすい形で整理されていることが極めて重要である。

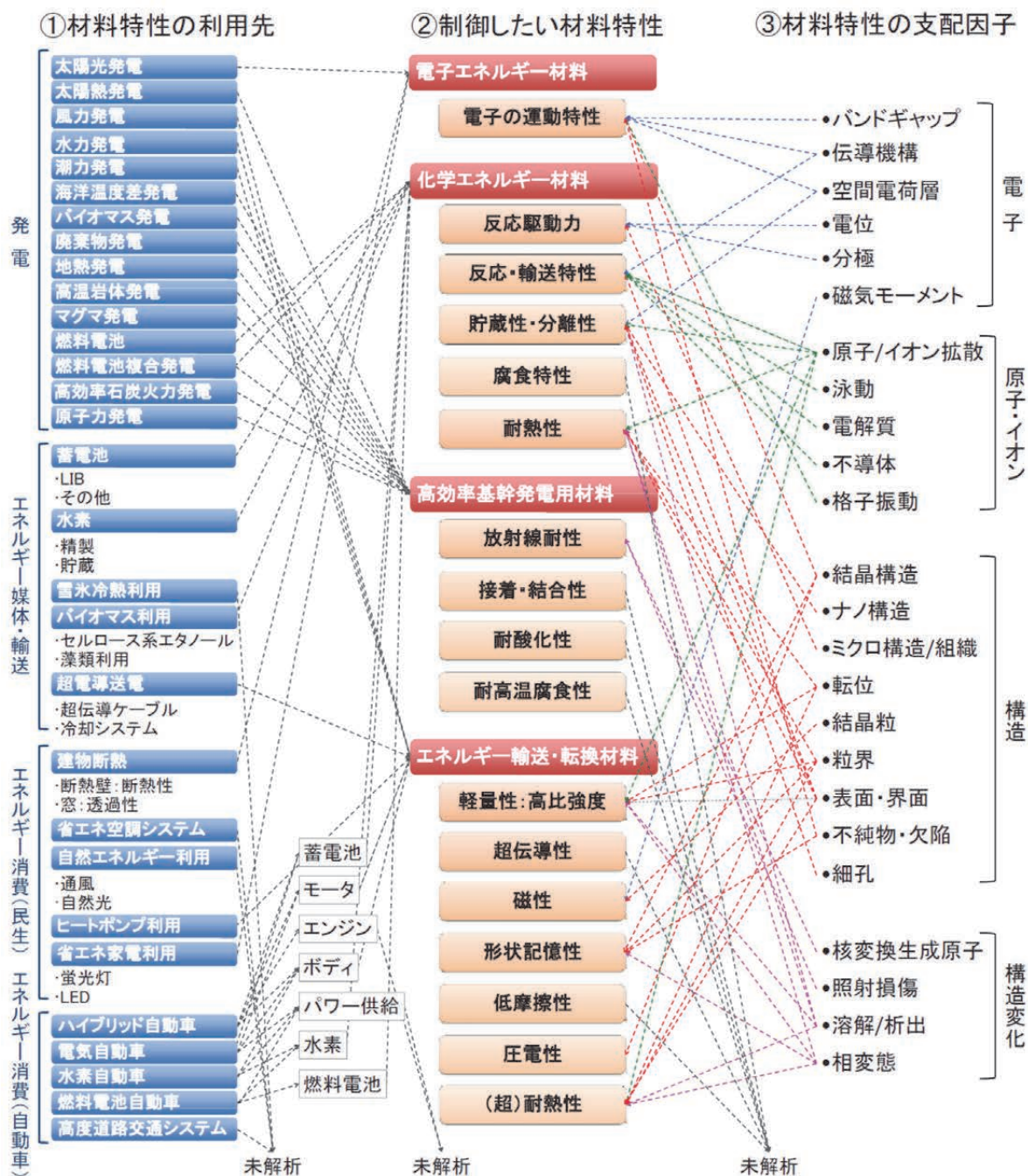


図 2-19 低炭素社会構築に資する材料の開発で用いられるデータ空間の俯瞰図
 (②-③の相関を示す線は、電子(青)、原子・イオン(緑)、構造(赤)、構造変化(ピンク))

2.5.3 今後の課題

マテリアルズ・インフォマティクスの目標は、高速計算・自動計算を背景として情報科学の知見と物質・材料研究が融合することにより、材料開発・物質探索をこれまで以上に効率的に行うというものであった。本節では、その取り扱うデータ範囲を、社会ニーズまでを含む形で拡張することを述べてきた。それは、具体的には、LCS の社会ニーズを科学技術にバックキャストする取り組みを、材料研究の創製ブ

ロセス→構造→特性の連鎖に接続することを意味する。この拡張により、材料開発における「効率的」という言葉の中に、「社会ニーズまでを踏まえる」という意味が含まれることになる。

LCS は、低炭素社会構築という世界的な重要課題の達成に向けて、バックキャスティングにより必要な技術の見定めと社会実装を総合的・定量的に検討しているが、その検討結果が、今この時点での開発現場や社会生活に浸透してこそ、その活動の意義が出てくる。この「データ活用型材料研究」に関しては、物質・材料に関する基礎研究を進める NIMS との協力の下で進めてきているが、まさに、LCS の取り組みを、今この時代における「材料研究開発の現場」に浸透させるための取り組みの一つに数えることができ、その意義を強調しておきたい。

最後に、今後の更なる展開に向けて、これまでの活動を踏まえて考えられる重要課題を以下のとおり挙げる。

- ・「材料の利用者」「材料の開発者」の両者が共有できる材料特性の記述・分類方法の確立
- ・データ空間記述のための語彙集の整備
- ・「使用」までを踏まえたデータ空間の俯瞰
- ・社会ニーズまでを踏まえたデータ活用型材料研究の推進と予測モデルの革新
- ・予測モデル連鎖の欠落部やボトルネック部から重要課題領域の発掘
- ・社会ニーズまでを含めた計測・評価ツールやデータの共通化・統合化の可能性追求
- ・ツールやデータの共通性・統合性から、新原理・新設計手法の着想を得たり、新規計測技術を提案

これらの課題解決に向けて、LCS-NIMS の協働体制を今後も維持更には拡張し、データ活用型材料研究の可能性を具体的に追求していくことが、将来と今を結びつける実効的なバックキャスティングの達成に向けて極めて重要である。

2.6 定量的技術システム研究成果の活用・普及に向けて

これらの定量的技術システム研究の成果は、その活用・普及に向けて、JST の業務の効果的・効率的な運営に活用するとともに、より幅広い活用を促進するために、国、大学、企業、地方自治体等の関係機関及び国民に向けて積極的に発信している。いくつかの事例について以下に紹介する。

2.6.1 ALCA ボトルネック課題検討に参画

先端的低炭素化技術開発（ALCA）の平成 26-28 年度募集にて、ALCA 橋本和仁プログラムディレクター（PD）からの要請を受け、「技術のボトルネック抽出」に LCS 研究員等が継続的に参画している¹⁴⁾。社会シナリオ研究の成果を活用し、ALCA 平成 27 年度公募革新技术領域 4 分野のうち「高効率 2 端子型太陽電池の接合界面の解明と技術開発」「太陽電池用 Si 単結晶の薄肉化技術」2 分野を LCS から提案した。あわせて「CO₂ 分離・回収エネルギーの最小化を目指した革新的 CO₂ 分離技術」の設定に対して知見を提供している。平成 28 年度のボトルネック開発目標として「Pb

¹⁴⁾ALCA については、<http://www.jst.go.jp/alca/>参照。

フリー及び高耐久性ペロブスカイト太陽電池」「Si 系タンデム型太陽電池の接合界面の解明とプロセス制御」「超薄型結晶系 Si 太陽電池作成技術（光閉じ込め技術、パッシベーション技術、40 μ m 以下シリコン基板作製など）」「固体電解質形燃料電池（SOFC）の低温作動化」等の技術課題を提案している。

2.6.2 日本学術会議と再生可能エネルギー導入の課題を抽出

日本学術会議と共同で国際シンポジウム「日本における再生可能エネルギーの利用拡大に向けて」（H27/2/12@日本学術会議）を企画・開催した¹⁵⁾。世界各国のエネルギー変革の現状を知り、我が国の再生可能エネルギーに関する現状の問題点・課題・対策について国内外の有識者と議論し、再生可能エネルギー導入の課題抽出、社会シナリオに反映を行った¹⁶⁾。参加者から「知見を得るにふさわしいシンポジウムでした」「海外の事情も含め、日本のエネルギー事情の中でいかに再生可能エネルギーを導入していくかの問題点と解決への課題が良くわかった」等、好評を博した（参加者：289 名）。

登壇者：

第 1 部：基調講演

基調講演 1「ドイツの再生可能エネルギーの現状と今後の政策」

Shikibu Oishi（ドイツ連邦共和国大使館 経済・通商政策担当上級専門官）

基調講演 2「米国とクリーンエネルギー：米国エネルギー省の一見解」

Jeffrey A. Miller（米国大使館 エネルギー主席担当官 エネルギー省日本事務所代表）

基調講演 3「再生可能エネルギーを中心とした電源構成の可能性」

山田 興一（JST-LCS 副センター長、東京大学総長室顧問）

第 2 部：パネルディスカッション

(1)イントロダクション

～日本学術会議東日本大震災復興支援委員会エネルギー供給問題検討分科会報告概要～

太田 健一郎（日本学術会議特任連携会員、横浜国立大学工学研究院グリーン水素研究センターセンター長・特任教授）

瀬川 浩司（日本学術会議特任連携会員、東京大学先端科学技術研究センター附属産学連携新エネルギー研究施設長・教授）

(2)パネルディスカッション

モデレータ

平沼 光（日本学術会議特任連携会員、公益財団法人東京財団研究員兼政策プロデューサー）

パネリスト

基調講演 3 名

イントロダクション 2 名

Paul Roberts（ニュージーランド大使館一等書記官）

近藤 道雄（独立行政法人産業技術総合研究所福島再生可能エネルギー研究所所長代理兼上席コーディネータ）

¹⁵⁾<http://www.scj.go.jp/ja/event/pdf2/206-s-0212.pdf> 参照。

¹⁶⁾講演資料については、<http://www.jst.go.jp/lcs/events/sympo20150212/>参照。

齊藤 哲夫（一般社団法人日本風力発電協会企画局長）
大崎 博之（東京大学大学院新領域創成科学研究科先端エネルギー工学専攻
教授）

2.6.3 NEDO-TSC 共催ワークショップを開催

LCS はこれまで、エネルギー・環境問題の解決及び産業技術力の強化に取り組んでいる NEDO との連携体制を継続している。その中で、NEDO 技術戦略研究センター（TSC）のミッションについて紹介いただくとともに、LCS の社会シナリオ研究の成果の紹介、技術テーマごとの打ち合わせを行っている。

平成 27 年度は、NEDO-TSC と「再生可能エネルギーのコスト構造と低減に向けた方策」ワークショップを共同で企画・開催した（H28/2/4@JST）¹⁷⁾。再生可能エネルギーの事業や研究開発にかかわる関係者（発電事業者、投資家、エンジニアリングメーカー、機器メーカー、コンサルタント、大学、研究機関、行政機関）等を対象に、再生可能エネルギー普及の課題であるコストに焦点をあて、NEDO は産業技術のシナリオ、LCS は科学技術に立脚したシナリオという両者の異なる視点から「太陽光発電及びバイオマス利用技術」のコスト構造・影響を与える要因・重要技術開発項目等を紹介・討議した。議論の中で得られた知見を社会シナリオ研究の推進に反映している。

登壇者：

オープニング：

川合 知二（NEDO-TSC センター長）

山田 興一（JST-LCS 副センター長）

プレゼンテーション：

(1) 太陽光発電技術

米倉 秀徳（NEDO-TSC 再生可能エネルギーユニット研究員）

井上 智弘（JST-LCS 研究員）

(2) バイオマス利用技術

矢部 彰（NEDO-TSC 再生可能エネルギーユニット長）

浅田 龍造（JST-LCS 主任研究員）

パネルディスカッション：

「太陽光発電及びバイオマス利用技術を中心としたコスト構造と低減に向けた方策」

モデレータ

渡邊 重信（NEDO-TSC 再生可能エネルギーユニット 統括研究員）

¹⁷⁾<http://www.jst.go.jp/lcs/events/ws20160204/>、http://www.nedo.go.jp/events/NA_100011.html、及び
http://www.nedo.go.jp/events/report/ZZTSC_100006.html 参照。

2.6.4 再生可能エネルギー大量導入時の電力システムのあり方と水素の役割

ビジョン主導型の研究開発プログラム COI との連携 WS
2015 年 9 月 16 日 @ 学士会館¹⁸⁾

低炭素化には、省エネルギーに加え、使用するエネルギーの低炭素化が重要である。日本では、福島原発事故の影響に加えて、低炭素電源である原子力発電の再稼働に難航している事情もあり、再生可能エネルギーの大量導入が他国に比べてより深刻な急務である。一方で、国内では、再生可能エネルギー大量導入時の電力システムの運用・制御についての懸念が高まっており、諸外国の事例も踏まえ、これまでとは異なる技術や観点について、どのように実務に落としとしていくか、様々なステークホルダー間における情報共有と枠組みの構築が必要である。

一方で、日本でも 2016 年 4 月より電力小売が全面自由化となり、また 2020 年には法的発送電分離が実現する予定であることから、システムの安定運用に必要なアンシラリーサービスについてはだれがどの程度負担するか、という枠組みの構築も必要である。更に、燃料電池車や燃料電池の実用化・普及も始まっており、再生可能エネルギーの余剰分を水素として貯蔵することも、議論として現実的なものとなってきた。

再生可能エネルギーが大量導入された場合、特に変動電源である太陽光発電や風力発電が占める割合が増えた場合には、①供給過剰の時間帯が生じる、②急なバックアップ電源の出力上下の必要が生じる、③バックアップや周波数変動対応を行う電源の収益性が低くなり容量が足りなくなる、といった課題が指摘されている。再生可能エネルギーの比率が高い欧州や米国カリフォルニア州では、①については出力抑制や広域運用、②については水力・揚水・ガス火力（や広域運用）、③については容量市場、容量メカニズム、レギュレーション市場といった経済価値を創出する規制と市場の設定によって対応している。また、今後より再生可能エネルギーが導入されることを想定し、蓄電池や水素による貯蔵も考慮されている。このような議論は、技術的には解決可能であるが、市場の設計や経済負担の公平性、効率性の観点から、現在欧米において様々な枠組みを試しつつ、その改訂が重ねられている。

日本では、東日本大震災後の福島第一原発事故の際の電源不足の経験から、電力広域的運用推進機関が設立され、現在広域運用や、容量市場（またはメカニズム）、周波数調整力（レギュレーション）市場についての検討が始まっている。一方で、将来の再生可能エネルギー大量導入社会を想定した場合、水素の役割も重要となってくる。

COI と連携した本ワークショップ¹⁹⁾では、自由化市場のもと、再生可能エネルギーが大量に導入した場合の電力システム運用・制御について、必要となる技術や経済的負担配分の方法について、実務者・研究者・政府関係者を招聘し、講演・議論を行ったものである。また、水素の製造・貯蔵・利用についても、最先端の知見を共有すべく講演・議論を実施した。

第 1 部は、「再エネ大量導入時の電力システム安定化技術とアンシラリーサービス」の副題のもと、九州大学炭素資源国際教育研究センター教授 原田達朗氏より、「九州地域における再生可能電源導入と電力供給・需要側からみた総合的な対策」のタイトルで講演いただいた。九州地域は、FIT 施行後、太陽光発電の大量導入・大量申請によって、最も早く再エネ出力が需要を上回る可能性が指摘された地域である。

¹⁸⁾<http://www.jst.go.jp/lcs/info/2015/09/post-39.html> 参照。

¹⁹⁾詳細は、3.4 項「ビジョン主導型の研究開発プログラム COI との連携」(p.69) 参照。

原田教授は、九州電力での実務者としての経験を踏まえながらも、余剰分を水素として貯蔵する等、先端的技術の活用によって、九州地域における再エネの大量導入の際の具体的方策について、クリエイティブな対応を提案いただいた。また、欧米の電力自由化について 1980 年代から研究を継続している電力中央研究所研究アドバイザー 矢島正之氏からは、「欧米における自由化市場での再エネ促進方策」と題した講演をいただいた。欧米における送配電運用を専門とする事業者が、これまで直面してきた課題を共有いただき、今後日本が法的発送電分離を実施する際の留意点について、特に上限価格設定の弊害などについてご意見をいただいた。次に、高瀬香絵 LCS 特任研究員(東京大学工学系研究科客員研究員)が「アンシラリーサービスによる価値創成と費用負担に関する米国の調査結果」と題し、2015 年 9 月に米国東部の RTO(Regional Transmission Operator)である PJM Interconnection, LLC を訪問し、アンシラリーサービスの市場運用についてのヒアリング結果を報告した。PJM の管轄地域では、再エネはまだ大量導入に至っていないものの(西部の CAISO 管轄地域では大量導入となっている)、より安価に公平に市場から調達するという理念のもと、様々なサービスを分割して市場を設定し、運用している実務状況を報告した。また、本田技研米国支社が参加するプロジェクトにおいて、電気自動車に搭載した蓄電池を使って周波数制御の市場に参加する実証実験が行われたことについても、ホンダ米国支社との打ち合わせによって得た情報を発表した。次に、吉岡剛 LCS 特任研究員(東京大学工学系研究科客員研究員)より、「地域エネルギー事業者としての費用負担への意見」と題し、地域再エネビジネスのコンサルティング経験をもとに、地域再エネ事業者にとっての望ましい費用負担の在り方について、出力抑制が事業性に与える影響も踏まえながら、発表を行った。再エネを推進するという国の方針がある場合において、特に地域振興を行いながら小規模で事業を行う地域再エネ事業者については、ある程度の保護策が必要であるとの主張であった。

第 2 部は、「貯蔵技術としての水素の可能性」の副題のもと、まず、九州大学 水素エネルギー国際研究センター教授 土肥英幸氏より、「再エネ大量導入における水素の役割と課題」のもと、講演いただいた。次に、三森輝夫 LCS 上席研究員より、「再エネから水素を作る技術のコスト展望」と題し、LCS にて実施しているプロセス評価の中間結果について発表した。最後に、LCS 研究統括/東京大学工学系研究科教授 松橋隆治より、「九州地区における再生可能電源と水素利用事業の分析枠組み」と題して発表を行った。

2.6.5 燃料電池とその利用システムに関するイノベーションの可能性

ビジョン主導型の研究開発プログラム COI との連携 WS
2016 年 3 月 9 日@学士会館²⁰⁾

低炭素化において、家庭用燃料電池の省エネ効果は大変大きいものの、その製造コストは高く、また市場価格も現状は高いものとなっており、普及があまり進んでいない。一方、燃料電池車は一般販売がスタートしており、技術の成熟が進みコスト低下が進展することへの期待も高まっている。近年、PEFC を中心とした燃料電池の技術革新は急速に進んでいる。また、電力市場改革が進行し、本年 4 月からは家庭用小売電気の全面自由化が予定されている。こうした状況の中で、燃料電池を利用した電力融通が開始される可能性がある。

²⁰⁾<http://enesys.t.u-tokyo.ac.jp/information/884/>参照。

一方、SOFC を開発する事業者もその高い発電効率から市場参入の機会を伺っており、PEFC とはまた別の事業スキームによって導入が進む可能性がある。

COI と連携した本ワークショップ²¹⁾では、自由化市場のもと、燃料電池とその利用システムに関するイノベーションの可能性を検討し、エネルギーシステム全体の中での貢献可能性について議論を行った。そして、エネルギーシステムのイノベーションにおいて、技術と制度に要求される条件について、実務者・研究者を招聘し、講演とパネル討論を行い、最先端の知見を共有した。

第 1 部は、「燃料電池の技術革新と利用システムの革新の可能性」の副題のもと、九州大学 共進化社会システム創成拠点 エネルギーモビリティユニット特任助教 立川雄也氏より、「PEFC, SOFC の技術開発動向からみる将来のエネルギー社会実装の方向性」のタイトルのもと講演いただいた。また、LCS 特任研究員でもある大友順一郎（東京大学大学院 新領域創成科学研究科准教授）より、「SOFC の技術的可能性と将来の発電効率および経済性」のタイトルのもと、講演があった。また、高瀬香絵 LCS 特任研究員（東京大学大学院 工学系研究科 客員研究員）より、「PEFC による一戸建て住宅街区における電力融通の可能性と経済性評価」のタイトルもと講演があった。最後に、LCS 研究統括／東京大学工学系研究科教授 松橋隆治より、「PEFC による一括受電マンションにおける電力融通の可能性と経済性評価」のタイトルのもと講演があった。

第 2 部はパネル討論であり、「燃料電池による事業スキームの可能性」の課題において、活発な議論が行われた。パネラーは、①吉岡剛 LCS 特任研究員（東京大学大学院工学系研究科 客員研究員）、②田中敏英氏（大阪ガス（株）リビング事業部 計画部 技術企画チームマネジャー）、③太田勇氏（ミサワホーム総合研究所 環境エネルギーセンター室長）、④清水俊克氏（パナソニック株式会社 スマートエネルギーシステム事業部 燃料電池事業担当）、⑤神谷俊之氏（静岡ガス株式会社 エネルギー戦略部 スマートコミュニティ開発担当 マネジャー）の 5 名の実務家を中心とした構成となっており、第 1 部における研究が現場においてどのように活用されてビジネス展開されているのかについて、知ることができる内容となった。

2.7 定量的技術シナリオの今後の取り組み

将来の「明るく豊かな低炭素社会」の実現に向けて、多様な研究開発課題の中から、今後重点的に取り組むべき課題を選定することが重要である。低炭素技術を個別に対象とした定量的技術システム研究により、その技術を更に進展させる研究開発課題が明確になることを示してきた。

LCS では、引き続き太陽電池やバイオマス、地熱、中小水力などの技術シナリオ研究を着実に進め、今後送電に係るコストを検討するため送電システムを対象とした調査・分析にも着手し、より詳細なシナリオ研究成果に基づいて「明るく豊かな低炭素社会」の姿を描き、バックキャスト手法によって今後重点的に取り組んでいくべき低炭素技術の研究開発の方向性、経済性を上げるためのテーマ等を示していく。

以下に、定量的技術システム研究において今後取り組むべき研究・調査の主な課題を記す。

²¹⁾詳細は、3.4 項「ビジョン主導型の研究開発プログラム COI との連携」（p.69）参照。

- ① 正確な再生可能エネルギー量の把握
- ② 太陽電池、風力、蓄電池等各エネルギー技術の進展を考慮したコスト・CO₂排出量の時系列変化、生産規模影響、資源量制限の考慮
- ③ 再生可能エネルギー設置容量に関係する各地の日射量、風力などの出力変動の把握
- ④ 出力変動への対応と蓄電池利用（電池寿命との関連）
- ⑤ 上記項目の検討結果を取り入れた電源構成、電力コストの計算
- ⑥ 電力コストを削減するための各エネルギー技術開発項目の明確化と定量的位置づけ及び技術シナリオ作成
- ⑦ CCS 及び水素の位置づけの明確化
- ⑧ 技術シナリオを取り入れた経済・社会シナリオ作成
- ⑨ ⑧でのシナリオ結果からの電力消費量の推定
- ⑩ 温室効果ガスを 80%排出削減した場合に変化するエネルギーシステム（供給側と需要側）、産業構造、社会の姿の提示

基本的要素技術（低炭素技術）が社会に受容されるには、本章で述べた「個別の技術開発とコスト効率性」に加え、「技術が受容されるための制度の支援(第 3 章)」、「社会への技術普及のためのインフラ的支援、市場（第 4 章）」が不可欠である。以下、これらのことを論じる²²⁾。

²²⁾ 詳細には、第 3 章では低炭素技術の導入・普及に対する制度、社会における個人の消費行動や市場などに関して、第 4 章では新しい低炭素社会を実現する社会システム、更には国際戦略という幅広い視点で評価をしている。これらの分析には第 2 章における技術評価が基盤となっており。また、新しい社会システムにおいて必要な技術要素を、定量的技術システムにフィードバックするダイナミックなプロセスを、LCS では実施している。

第 3 章 低炭素社会システムを社会実装に向けて展開する～「定量的経済・社会システム研究」の視点から

第 3 章では、【目的 3】「低炭素社会システムを社会実装に向けて展開する」視点から、新しい要素技術が社会に受容されるための課題となる社会制度を論じる。第 2 章に記載した低炭素技術の導入・普及を促進し、低炭素社会システムを社会実装に向けて展開し、経済の拡大へと結びつけていく取り組みを紹介する。

低炭素技術のイノベーションにより、技術の性能の向上と経済性の改善が進展することが見込まれる。「明るく豊かな低炭素社会」の実現には、低炭素技術のイノベーションに続いて、低炭素技術の導入・普及の促進と技術利用に伴う経済の拡大に繋げる「社会システムのイノベーション」を図らなければならない。

LCS では、家庭部門におけるエネルギー消費量の増大を効率的に抑えることを目的に、ICT を用いた電力・エネルギーネットワーク技術等を活用した、安全かつ安定的で社会の負担の少ない需給制御システムを設計した（第 3 章 3.2 節）。また、より良い暮らしと低炭素化が同時に実現する社会のイノベーションの創出を目的として、人文・社会科学等の知見を幅広く取り入れる取り組みを行っている。関係機関・組織、低炭素技術の実社会・実生活への導入・普及に資する知見を有する専門家等との連携・協力の推進、社会実装に向けたネットワークの拡大等により、低炭素化につながる個人の消費行動や市場等の変化が期待できる仕組みを設計した（第 3 章 3.3 節）。併せて、10 年後の目指すべき社会像を見据えたビジョン主導型の研究開発プログラムである COI の「共進化社会システム創成拠点」（九州大学）との連携について紹介する（第 3 章 3.4 節）。

3.1 低炭素技術の導入・普及促進に向けて

我が国の CO₂ 排出の部門別推移を見ると、民生部門（家庭部門と業務部門）は増加傾向にあったが、近年は横這いであり、今後は、2030 年に向けて低減させていく必要がある。優れた低炭素技術を私たちの暮らしの中に取り入れて利用することで、CO₂ 排出量を削減し社会の低炭素化を図ることができる。社会の低炭素化に向けて、低炭素技術の導入・普及を積極的に取り組むことが重要である。

民生部門においてエネルギー消費を抑制し CO₂ 排出量を削減する方法として、省エネ性能に優れた家電製品や家庭用燃料電池コジェネレーションシステム、断熱性能に優れた住宅・建物の新築・改築などが挙げられる。これらは、家庭全体のエネルギーの利用効率を高めて消費量を抑制し、CO₂ 排出量削減に効果があり、光熱費の節約といった経済的利益をもたらす。LCS では、従来機器を使用する家庭に低炭素機器を導入することにより、最終エネルギー消費量を 1/4 程度に減少できる結果を得ている²³⁾。また、導入に係る経費は耐用年数以内に回収することが可能であり、回収後も引き続き経済的利益を得ることができる。

経済的利益が見込めるにも関わらず、低炭素技術の導入・普及が進まない現状がある。LCS が実施した調査では、その主な理由として、「価格が高い・投資回収年数が長い」に加えて、「初期投資を払うお金はないがローンを組むことに抵抗がある」や「忙しいなど時間がない」が挙げられていた。これは、人々が経済的利益を

²³⁾LCS, プレスリリース「エネルギー・環境に関する選択肢」の国民生活への経済影響と解析（平成 24 年 7 月 25 日）より。<http://www.jst.go.jp/pr/info/info898/index.html> 参照。

もたらず低炭素機器の導入の場合であっても、初期投資やローンへの抵抗があることを示し、経済的に合理性のある行動とは異なる選好を持っていることを示唆しており、低炭素技術の導入・普及を図るためには、それらを考慮する必要がある。

3.2 民生家庭部門の低炭素化の促進：電力使用量の見える化

【LCS 提案書番号：FY2015-PP-11】²⁴⁾

LCS では、生活の質を落とさずに家庭部門の低炭素化を実現するために、LCS が提案するエネルギー技術・経済統合モデルに基づき、各種低炭素化策について環境・経済面から実施効果を推計するとともに、社会実証実験「家庭の電力使用量見える化実験（図 3-1）」を通して各種低炭素化策の普及促進に向けた検討等を行うための研究体制を構築した。具体的には、関東地方及び近畿地方の 23 地方自治体・229 世帯（平成 25 年度末現在）の参画を得たネットワークを構築して、平成 25 年度から社会実験を実施している。実験では、電力消費量を 1 分間隔で計測する機器を各家庭の主幹電源、エアコン、冷蔵庫、テレビに設置し、計測データは家庭との情報交換用 WEB ページ「i-cosmos（アイコスモス）[1]」にリアルタイムで表示している。

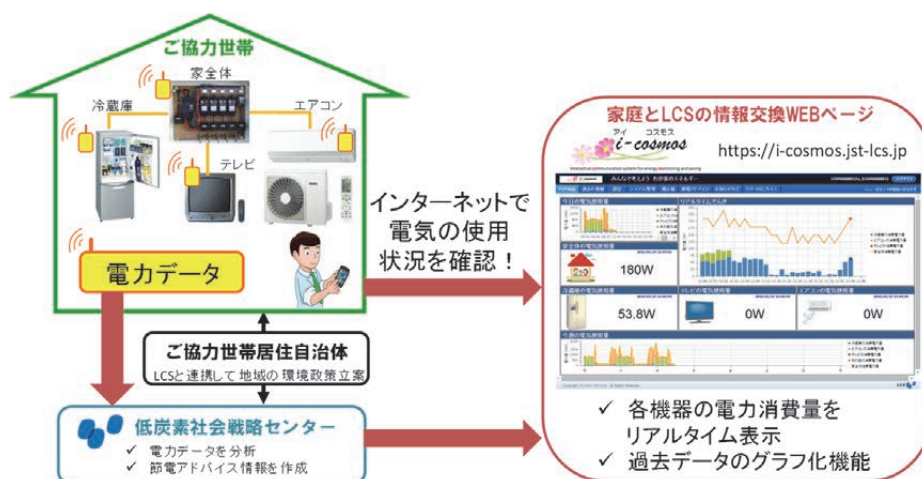


図 3-1 家庭の電力使用量見える化実験の概要

3.2.1 家電の省エネポテンシャルの推計

(1) 冷蔵庫の電力消費量実態から見た節電効果

冷蔵庫のデータ分析では、実験協力家庭の約 27% で買い替えによる節電余地があることが確認された。これらの家庭の冷蔵庫年間消費電力は 600kWh を超えており（平均値は年間 804kWh）、最新の冷蔵庫（年間消費電力 200kWh）へ買い替えた場合、年間の電気代は平均約 1/4 に削減され、冷蔵庫耐用年数以内に初期投資を回収できることから、費用便益評価を実際の行動につなげるために、現在 LCS で取り組んでいる「電気代そのまま払い事業」への誘導も期待できると考えられた。また、実験協力家庭の約 70% で冷蔵強度の設定変更による節電余地もあることが確認された。

²⁴⁾ 本項目では、LCS 提案書(FY2015-PP-11)を中心に概説する。LCS 提案書番号については巻末を参照。

(2) テレビの電力消費量実態から見た節電効果

テレビのデータ分析では、実験協力家庭の約 81% で画面輝度の設定変更による節電余地があることが確認されたほか、意識上の視聴時間よりも実際の視聴時間の方が長い傾向にあったことから、こまめな電源オフも有効であることが示唆された。

3.2.2 省エネ行動促進のための節電アドバイス機能

継続的な省エネ行動を促すためには、単に電力使用量を表示するのではなく、他者との比較による社会規範評価の刺激や必要最低限の情報を効果的に提供するナッジ（“Nudge”）の概念²⁵⁾を取り入れることで低炭素化行動を支援する必要があることが、本実験で実施したアンケート調査[2]により明らかとなった。

LCS では実際に低炭素化行動を促すために社会規範評価を刺激する仕掛けを取り入れた「節電アドバイス機能」を開発し、i-cosmos に実装した。具体的には、過去の電力計測データと i-cosmos 上で回答したアンケート調査[2]に基づいて、その家庭が実施していない節電対策の中で最も節電効果の高いアドバイスを自動選択し、他者との比較も取り入れながら、直感的にわかりやすい 4 コマストーリーで節電アドバイスを表示するシステムを開発した。図 3-2 に冷蔵庫の節電アドバイスを例示する。

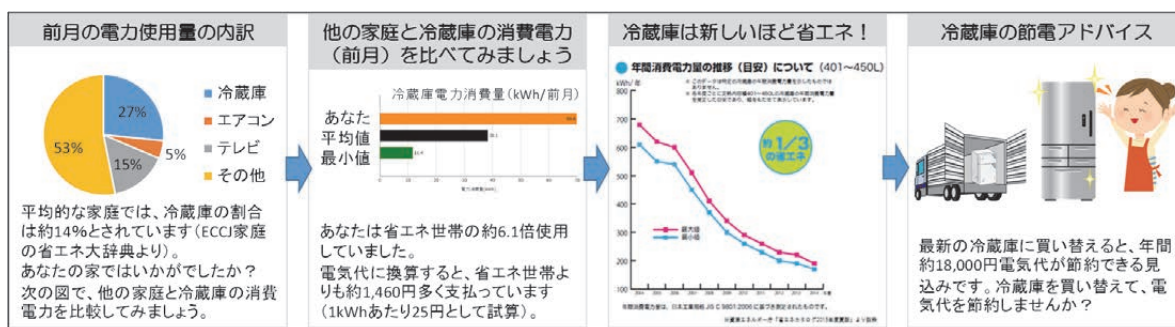


図 3-2 冷蔵庫の節電アドバイスストーリー例

また、過去の電力消費量実績データや天気予報に基づいて翌週の電力消費量を予測し、目標値として表示するシステムを開発した。図 3-3 に目標値表示機能を例示する。本システムでは個人の目標値のほか、特定の条件に基づきグループ化された複数家庭の合計電力消費量目標値も表示することができ、ネガワット取引など電力需要の制御への活用も期待できると考えられた。節電アドバイス機能及び目標値表示機能は、平成 28 年 1 月より i-cosmos に実装している。

²⁵⁾ ナッジ（Nudge）とは、「（注意を引くためひじで）そっと突く、（ひじで）そっと（横に）押して動かす、そっと動かす。」等を意味する。すなわち、ナッジ（Nudge）の概念は、情報の提供量を絞り、その家庭にとって必要な、最小限の情報を提供することが、行動を促すのに有効であるという概念である。

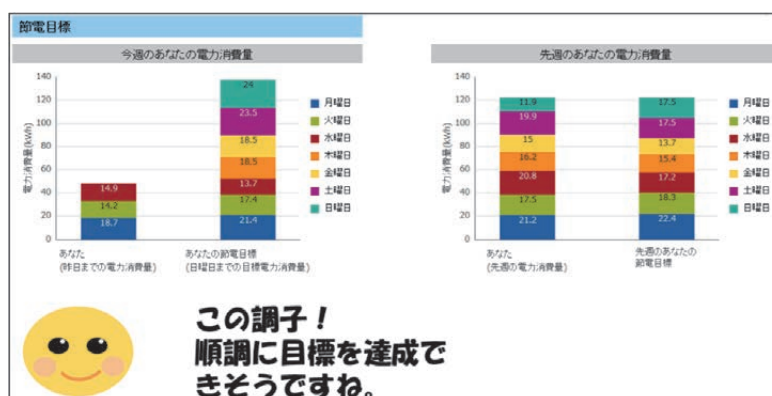


図 3-3 電力消費量目標値の表示例

3.2.3 実証実験の連携の必要性

今後もデータ分析を進めて節電アドバイスに応用可能な知見を得ると同時に、節電アドバイスや節電目標の提示による実際の節電効果を明らかにし、日本全国に本システムを広める必要がある。きめ細かい検討を行うためには、統計上必要とするサンプル数にすることが望まれる。国や自治体、大学・研究機関においても、家庭を対象とした実証実験を進めており、エネルギー消費量データも取得されている。低炭素化に向けた方策を効率的に検討するためにも、実証実験を実施する機関が連携して散在するデータを集約し、非営利目的で活用できる仕組みが必要である。

参考文献

- [1] LCS提案書(FY2013-PP-09)、社会システム編「民生家庭部門の省エネルギー促進からの低炭素社会実現」、2014年3月。
- [2] 家庭の電力見える化実験 速報版、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、<http://www.jst.go.jp/lcs/activity/result/mieruka/result2.html> (アクセス日2016年3月1日)。

3.3 民生部門の省エネへ向けた「電気代そのまま払い」

【LCS 提案書番号：FY2015-PP-15】²⁶⁾

家庭部門や中小規模の業務部門の省エネは、宝の山である。手つかずのポテンシャルが多く残されているからだ。特に、古い冷蔵庫、古いエアコンはまだ残っており、エネルギー消費は半分以下になるものも多い。LCS による推計では、冷蔵庫を全て最新のものに買い替えることで、家庭の電力消費の約 25～40%が削減可能である。

では、どうして買い替えが進まないのでしょうか。その一番の理由は、「まだ使えもったいないから」であり、約 4 割を占める（図 3-4 参照）。次に、「元をとるまで長い」や「価格が高い」があり、10～20 万円の出費が家計や事業体にとって重いものであることがわかる。

²⁶⁾ 本項目では、LCS 提案書(FY2015-PP-15)を中心に概説する。LCS 提案書番号については巻末を参照。

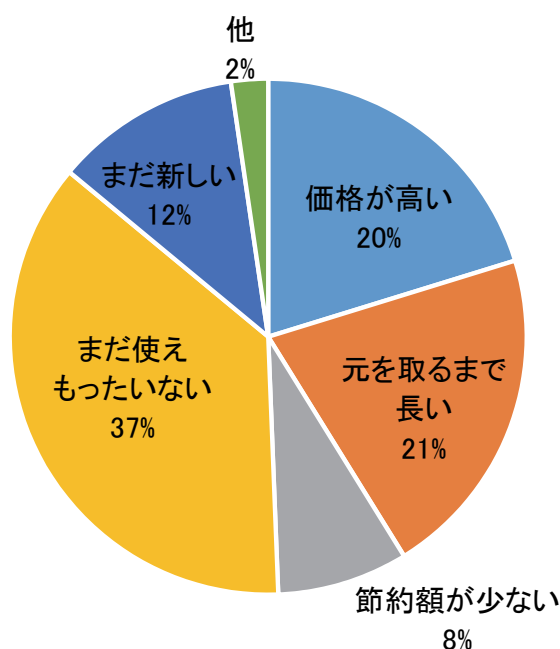


図 3-4 買い替えない理由
 (2015 年実施の 1 万人を対象としたインターネットアンケート調査結果より)

LCS では、「もったいない」と「価格が高い」を乗り越えて、まずは冷蔵庫の買い替えを進め、徐々に対象を拡大すべく、「電気代そのまま払い」を提案し、現在自治体や企業と協働で実証実験を実施している。

「電気代そのまま払い」とは、電気代が節約になった額を月々電気代に上乗せて返済することで、家計の日々の出費は変わらずに、冷蔵庫が新しくなり、電力消費や CO₂ 排出量も減少する仕組みである。

世界では、英国において 2013 年より主に家庭を中心に、政府がファンドを構築し、電力会社に徴収を義務付け（ライセンス発行の要件とする）、家庭省エネ診断士や診断ソフトを政府主導で開発・整備し、実施した（なお、大臣の交代によって、ファンドによる新たな融資は凍結している）。また、米国では、地方自治体主導で、初期投資はファンド等が融資し、返済は固定資産税に上乗せて返済する PACE (Property Assessed Clean Energy) が拡大している。PACE は現在も順調に拡大を続けており、固定資産税が先取権（デフォルト時に最初に資産を没収する権利）を有することから、住宅金融公庫による反対や訴訟をうけた経緯があるが、事実上、デフォルト時にならないと問題は発生しないため、実際には拡大を阻止するものではないとのことである（2015 年 PACENow 事務局ヒアリングによる）。また、発展途上国では、電線が来ない地域や不安定な地域において、ソーラー・ホーム・システムが有効だが、この支払いについてマイクロファイナンスによって初期投資ゼロで導入する仕組みが広がっている。バングラデッシュのグラミン・シャクティの例などがある。

日本では、スマートフォン契約時に、電話代に 2 年間といった期間の間、機器代を上乗せるビジネスモデルが普及している。よって「電気代そのまま払い」について理解する土壌はすでにあることが期待でき、ステークホルダーとなる流通・メーカー・消費者のインセンティブ設計が肝になると予想される。

このような世界、日本の状況の調査を踏まえ、実証実験を設計、進行している。以下、実証実験の取り組みについて概要を述べ、また、諸外国の事例についても概説する。

3.3.1 「電気代そのまま払い」実証実験の現状と課題

LCS では、東京大学松橋研究室（Center of Innovation EMS サテライト、以下 COI-S）、プラチナ構想ネットワークとの協力のもと、企業、自治体、省庁と連携し、2015 年より「電気代そのまま払い」実証実験を実施している。

提案の背景としては、特に家庭部門、中小規模の業務部門において、家計や事業体にとってメリットが生じるにもかかわらず、省エネルギー・再生可能エネルギーが導入されていない場合が多いことにある。メリットとなるのに導入しない要因として、価格（または初期投資）が高額であることや、投資回収年数が長いことが挙げられる。

初期投資が高く、投資分を回収するのに期間が長い場合、利子等の融資コストが高くなるという難点がある。家庭部門や中小規模業務部門は、デフォルトリスク（債務不履行リスク）が高いと認知されており、無担保の場合、それをカバーする利子が大変高いものとなる。

今回、実証実験を実施している「電気代そのまま払い」については、1) 電気代という不払い率の低い料金徴収に上乗せて行うことでデフォルトリスクを下げる、2) 信用調査はクレジットカードの通常の信用調査に任せることで手数料を下げる、といった方法の工夫を行っている。

また、J-クレジット制度による J-クレジットの創出を行うことで、省エネになる買い替えについては経済性が高まる可能性についても枠組みに含めている。

(1) 「電気代そのまま払い」とプロジェクト全体の枠組み

「電気代そのまま払い」とは、省エネ・再エネ機器を家庭等に設置する際に、初期費用をファンド等が肩代わりし、月々の返済額は、省エネ分・創エネ分以下に設定する枠組みである。つまり、家庭は一切のライフコスト増なしに、低炭素機器の導入ができ、返済終了後は省エネ・創エネによるメリットを享受できるということになり、可処分所得が増加することになる²⁷⁾。

「電気代そのまま払い」プロジェクト全体の枠組みについて、図 3-5 に示した。LCS に加えて、東京大学 COI-S、プラチナ構想ネットワークがその主体（「電気代そのまま払い」プロジェクトチーム。以下、プロジェクトチーム）となっている。図 3-5 に示すように、各実証実験構成に応じて、企業・団体や地方自治体、政府関連部署の協力を得ている。

主体となっている 3 者の主な役割としては、東京大学 COI-S はデータの分析を行い、LCS は政策提言、プラチナ構想ネットワークは実証実験時の参画主体の募集や、政策普及時の参画主体の募集などを行うこととしている。

²⁷⁾ 投資額が、省エネタイプの冷蔵庫と省エネタイプではない冷蔵庫の差額とする考え方に立つと、追加投資額自体は大変低いものとなり、一方で省エネ額は、本枠組みによって前倒しになった期間の省エネ節約額ということになる。今回は、家計にとって追加投資額は冷蔵庫の購入にかかる全費用としたことから、省エネ節約額については、買い替え後の冷蔵庫の耐用年数内において発生するものと想定した。

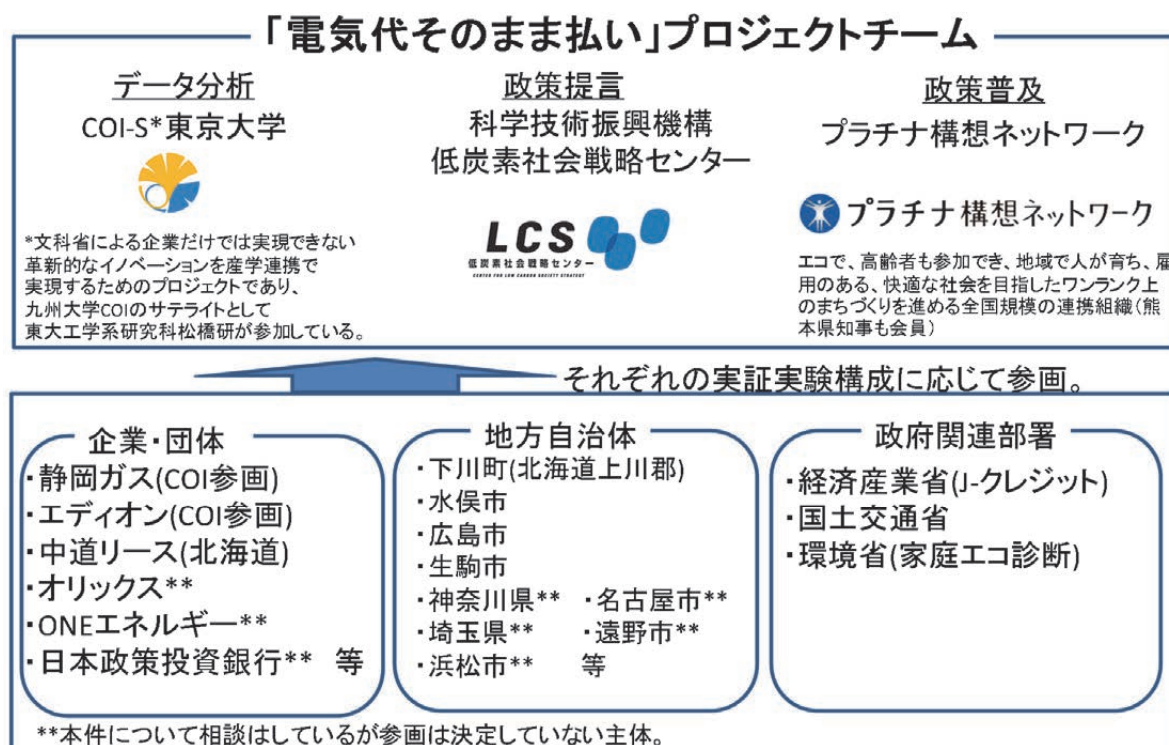


図 3-5 「電気代そのまま払い」プロジェクトチームと参画者の構成

(2) 実証実験の枠組み

実証実験については、まず多くの家庭や事業所において 24 時間 365 日稼働している冷蔵庫について、実施することとした。本実験の概要を示す表 3-1 の 3 か所は、実際に買い替え 1 号がそれぞれ発生し、実証実験が進行している。なお、冷蔵庫の買い替えによって減少した CO₂ 排出量について、J-クレジット制度による CO₂ クレジットの創出を可能とすべく、プログラム型プロジェクトとして登録が完了している(2016 年 4 月)。

実証実験の例として、図 3-6 に静岡ガスとの協働プロジェクトの枠組み概要を示す。静岡県長泉町の集合住宅居住者を中心に、約 20 世帯を募集し、HEMS と冷蔵庫のみの計測を行うタップを設置、冷蔵庫用の電力消費量を計測し、買い替え提案を「電気代そのまま払い」を含めて行う実証実験を進行中である。本実験では、リース会社が一旦冷蔵庫を購入し、電気代そのまま払いを選んで冷蔵庫を買い替える世帯にリースを行う。リース金額は、省エネとなる理論値以下に設定する。リース代の支払いが終了したのちには、冷蔵庫の所有権は参画主体のものとなる。省エネとなる金額の試算と、リース代についての明細発行は、前者についてはプロジェクトチームが、後者については静岡ガスが実施している。

なお、返済額は「みなし」の考え方にて、リース会社と家庭が合意した金額とする。計測によって節約となった金額は、例えば家族構成の変化や気候条件、詰め込み方等諸条件によって変化すること、そして計測を基準に返済金額を変動させる方法をとることで、事業のコストが大幅に増加すること、返済額は月額 1,000～3,000 円と大きな金額ではないことから、家計にとっては「みなし」の方が理解しやすいことによる。変動型とすることで、返済期間が延びる等の方が、家計にとっては不

確実性が上がり、制度の受容性が下がるとのヒアリング結果に基づく判断である。英国グリーンディールや、日本における ESCO 事業においても、「みなし」の考え方にて返済額を設定する方法は広く採用されている。

表 3-1 実施中の「電気代そのまま払い」実証実験の概要

実証実験	連携先	買い替え対象	概要	方式	返済
① 静岡県 長泉町	静岡ガス	家庭の 冷蔵庫	約 20 世帯に HEMS を設置し、 買い替え推奨世 帯にはプランを 提案。	リース後譲 渡方式	ガス代と同じ支払 い方法にて静岡ガ スに返済。
② 北海道 下川町	下川町	家庭の 冷蔵庫	約 12 世帯に HEMS を設置し、 買い替え推奨世 帯にはプランを 提案。	リース後譲 渡方式と、 家電量販店 による割賦 販売方式	下川町から電力購 入している世帯は 電気代に上乗せて 返済、それ以外は 独自に返済。
③ 熊本県 水俣市	水俣市	飲食店 の冷蔵 庫	計測器を設置 し、買い替え前 後の効果を測定 し、買い替えを 提案。	省エネサー ビス契約 (リース) 方式	独自に返済。

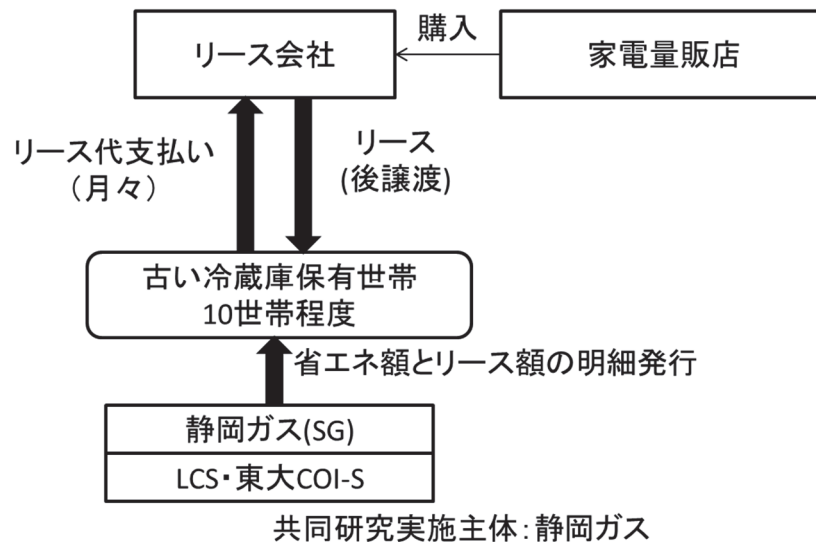


図 3-6 静岡ガスとプロジェクトチームによる実証実験の枠組み概要

現在、①静岡、②下川町、③水俣市において 1 件ずつ買い替えが実施された。この買い替えによって、①・②においては、冷蔵庫に使う電力の 65～80%、該当家庭

の電力需要の 25～30%程度に相当する省エネがあった。つまり、冷蔵庫を買い替えたことによって、家庭の電力需要が約 3 割減少したのである。なお、1 件は 1997 年製であり、購入後 19 年が経過している。もう 1 件は、製造年は不明であるが、200L 以下の小さなものから 365L の中型のものに買い替えたところ、電力消費は減少した。

(3) 実証実験によってわかったこと

①静岡の場合、ガスの販売促進のための家庭向けガス機器リースを行う子会社であるリース会社が、手数料ではなくガス、現在は電気の販売契約を得るためのサービスとして、リースを実施している。よって、手数料を大きくすることよりも、本業であるガス・電力販売事業において契約の獲得・維持ができることが事業者の事業実施のインセンティブとなる。一方、大規模な業務ビルを多く手掛ける ESCO (Energy Service Company) へのヒアリングによると、1 件当たりで得られる省エネ量が手数料につながることから、小口を扱うインセンティブは存在しない。よって、家電を販売する、電力契約を維持または獲得する、といった別の事業の付加価値として、電気代そのまま払いのための省エネ診断、融資や返済、J-クレジットの申請といった業務を実施することで、本枠組みが現在日本で行われているビジネスの方法になじむことがわかった。本来コストはどの科目で発生しても同じはずであるが、実務上はマーケティングに使うことはできても、独立採算を狙うと成立しない等の制約がある。このような実態を反映した上で、現段階において実行可能なビジネスモデルとして、静岡ガス主体のプロジェクトは大変有効なものとなった。静岡ガス担当者も、今後本モデルを発展させる意向とのことである。

②下川町の場合、人口 2500 人の過疎地であり、高齢化が進展した町である。前代町長の代から、村おこし青年隊をはじめ、バイオマス熱供給プラントや森林関連など、様々な補助事業に応募し、資源がない中で町おこしを図ってきた。その結果、若干の I ターンの若年世帯も増え、また広葉樹の多い森林を活かした林業を志す若者なども増えている。このような村においては、町役場の職員や NPO のスタッフなどが、顔の見える関係において省エネコンサルティングを実施することが有効である。今回の実証実験では、町役場と町の様々な公的業務を行う一般財団法人下川町ふるさと開発振興公社が各世帯を回って、ヒアリングや HEMS 設置の調整などを実施した。人と人との信頼関係のもとに様々な取引が成立する過疎地において、みまもりサービスとも一体化した形で、町が支援した低炭素化を実施することは、コベネフィットも多いと実感した。

③水俣市においては、業務用冷蔵庫について買い替え第 1 号となった。小規模商店などはまとまった資金が必要な場合、融資を受ける必要があるが、特に飲食店への融資は下りにくい、ないしは利子が高い。返済が電気代節約によって行われる本モデルについては、冷蔵庫が、過去に効率の悪いものの代替として使われている限り、省エネメリットは発生し続ける。事業本体の存続と関係なく、冷蔵庫の省エネメリットを十分に生かし切れる枠組みを考えることが重要であることがわかった。

3.3.2 諸外国における初期投資ゼロの低炭素投資促進施策の現状

海外動向としては、英国グリーンディールにおいて政府がファンドへの資金提供を中止した経緯と今後の見通し、米国 PACE (Property Assessed Clean Energy) の動向、及び発展途上国のソーラー・ホーム・システムへの融資を行うマイクロファイナンスについてまとめて紹介する。

(1) 英国グリーンディール

英国では、2013 年 1 月末から、エネルギー・気候変動省を中心としたグリーンディール政策が実施された。英国政府の 2050 年までに温室効果ガス排出量を 1990 年比で 80%削減するという法的拘束力を持つ目標のために、様々な政策を実施しているうちの一つである。

政府主導で法律の整備（2011 年エネルギー法、Energy Act 2011 や、それに伴う枠組み規制、実務規定等）、認証マークの整備、ソフトウェア仕様の決定を行い、運営を行う機関は、3 年間の補助の後自立するという約束の下、公募によって決定し、3 年間の運営予算を政府が提供している[1]。

表 3-2 に英国グリーンディール政策の概要をまとめた（文献[2]より抜粋）。

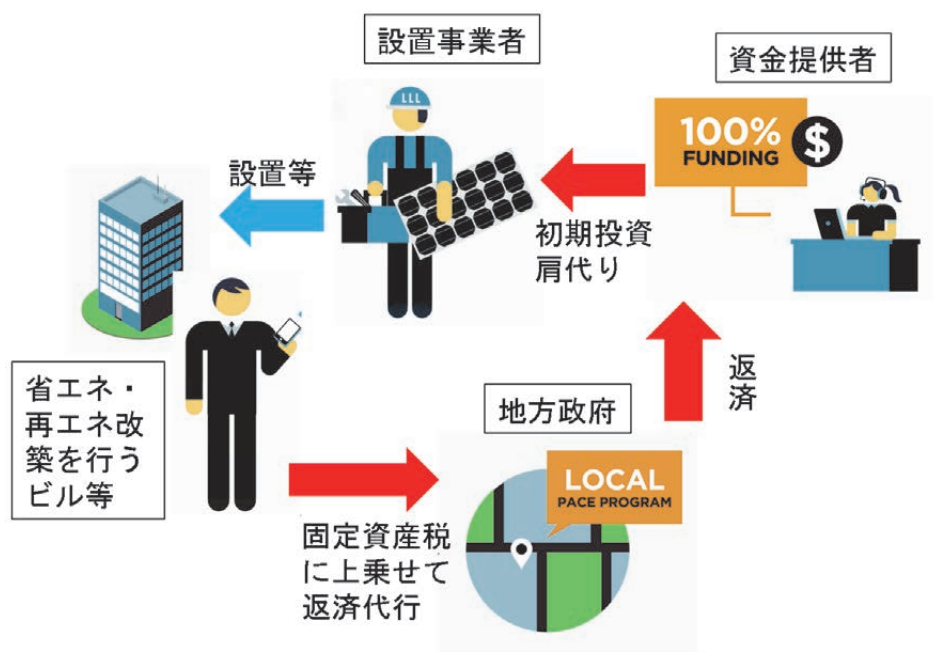
表 3-2 英国グリーンディール政策の概要[2]

目的	CO ₂ 排出削減	2050 年までに 80%減* （法的拘束力）
	エネルギー価格上昇による家計負担減	北海油田からの生産減少
	エネルギー安全保障向上	
	雇用創出	
特徴	初期負担なしに家庭・業務が断熱・ボイラー入替え等省エネ策を実施	
	節約になった金額以下を最長 25 年間返済	
	返済は電気代に上乗せ（電力供給者ライセンス要件）	
	月々の返済額は節約額を上回らない(基本原則)	
	負債は個人ではなく建築物（電力メーター）に付帯	
開始	2013 年 1 月	

*1990 年比

(2) 米国 PACE（Property Assessed Clean Energy）

米国 PACE は、2008 年にスタートした初期投資ゼロでの再エネ・省エネ投資の枠組みであり、返済は固定資産税として行う。図 3-7 に PACE の枠組みを示す。ビル等のオーナーが省エネ・再エネ設備の設置を行い、それに対して資金提供者が、設備やプロジェクト運営のコスト等、全てを肩代わりする。地方政府は、返済を固定資産税に上乗せて徴収し、それを資金提供者に返済するというファイナンス・サービスを提供する。



出典: PACEnow 提供資料をもとに作成

図 3-7 PACE の枠組み

(3) 発展途上国におけるソーラー・ホーム・システムのマクロファイナンス融資・Pay-As-You-Go (PAYG)

家庭に数個の LED 電球が灯り、携帯電話に 1 日 7 時間程度充電ができる電力を供給する「ソーラー・ホーム・システム (SHS)」が、途上国の無電化村を中心に普及している。SHS は 20～85W 程度のソーラーパネルと蓄電池を中心とし、多くの場合 LED 電球とセットで提供する。価格は 2～5 万円程度である。

インドの Simpanetworks 社が提供する支払い方は、Pay-As-You-Go (PAYG) と呼ばれるものであり、設備費の 10% の頭金を徴収した後は、払える分だけを携帯電話の電子マネーにチャージし、Simpanetworks 社は支払った分のみの利用について、現地のロックシステムを解除する。返済が完了すると、ロックは解除され、住民は自由にシステムを利用することができる。

3.3.3 結言

LCS 提案書 (FY2015-PP-15) では、LCS・COI-S 東京大学・プラチナ構想ネットワークにて提案し、実施している「電気代そのまま払い」の枠組みについて、その実証実験の詳細を紹介し、国内外での取り組みについて紹介した。

実証実験は家庭・小規模業務部門について、冷蔵庫を対象とした「電気代そのまま払い」を実装するものである。国内での初期投資ゼロの取り組みの多くは、大・中規模業務部門や太陽光発電を対象としたものであり、家庭の省エネに焦点を当てたものは存在しない。

その難しさとしては、家庭の与信のコストの割に得られるメリットが少ないという事実であるが、この点については、①省エネによって得られるメリットを事業利益とするのではなく、他の事業の販売促進策という位置づけになりえる枠組みとする、②行政サービスの一環として行う、という工夫を行った。

初期投資のハードルを乗り越えようとする他国の事例や、日本国内でも HEMS 等を活用した取り組み事例も参照しながら、日本の家庭・小規模業務部門の省エネを大幅に進める枠組みについて、「電気代そのまま払い」の実証実験を更にバージョンアップさせ進めていく予定である。

その際には、与信を得にくい家庭・小規模な業務・産業部門の事業者に対して、6 年目以降の保証を行う公的ファンドの創設や、ソーラーパネル・蓄電池の残価保証をするための公的な買い取り制度の整備についても、実現性を探っていききたい。

参考文献

- [1] 「くらしからの省エネを進める政策デザイン研究国際ワークショップ～英国グリーンディールを参考に～」講演要旨（平成26年9月発行）、低炭素社会戦略センター、<http://www.jst.go.jp/lcs/documents/publishes/ws01.html>（アクセス日2016年3月1日）。
- [2] 高瀬香絵，“英国グリーンディール政策,” エネルギー・資源, Vol.36, No.3, 167-171, 2015年5月．

3.4 ビジョン主導型の研究開発プログラム COI との連携

10 年後の目指すべき社会像を見据えたビジョン主導型の研究開発プログラムである COI の「共進化社会システム創成拠点」（九州大学）との連携体制を深化、東京大学 COI サテライトとのワークショップの企画・開催を、これまで計 6 回実施した。

低炭素社会の実現には、再生可能エネルギーの大量導入が不可欠であり、それを支える電力システムをどうするかは大きな課題である。日本では、電力システム改革が進展しており、平成 28 年 4 月からの電力小売完全自由化や電力広域的運用推進機関の設置、平成 32 年には法的発送電分離などが進展している。大きく変化する電源構成のもと、効率的かつ安定供給を実現する新たな枠組みをどうデザインするかが重要な課題となっている。

COI「共進化社会システム創成拠点」は、地球規模で進む環境変化・国際化・人口問題等に対応できる持続可能な共進化社会システムの創成へ向けて「新たな都市 OS の社会実装」を目指している。LCS は九州大学と連携、東京大学 COI サテライトとの共催にてワークショップを企画・開催、くらしからの省エネを進める政策デザイン研究や再生可能エネルギーが大量に導入した場合の電力系統運用・制御、必要となる技術や経済的負担配分の方法、水素の製造・貯蔵・利用、燃料電池を利用した電力融通の可能性等について、最先端の知見を共有、講演・意見交換を実施している。

※役職、ご所属は当時のもの。

第 1 回 2014 年 2 月 24 日@学士会館

「くらしからの省エネを進める政策デザイン研究国際ワークショップ～英国グリーンディール政策を参考に～」

第 2 回 2014 年 7 月 16 日@JST 東京本部別館

「初期投資ゼロ金融による省エネ・再エネ事業推進枠組みの現状と課題」

第 3 回 2015 年 3 月 18 日@学士会館

「初期投資ゼロの『電気代そのまま払い』実証実験と今後の展開・課題」

第 4 回 2015 年 9 月 16 日 @ 学士会館

「再生可能エネルギー大量導入時の電力系統のあり方と水素の役割」

第 5 回 2016 年 3 月 9 日 @ 学士会館

「燃料電池とその利用システムに関するイノベーションの可能性」

第 6 回 2016 年 9 月 26 日 @ 学士会館

「パリ協定を踏まえた再生可能エネルギー大量導入と電力システムのイノベーション」

第 1 回から第 3 回開催までは以下に概説し、第 4 回及び第 5 回開催については第 2 章 6. 「定量的技術システム研究成果の活用・普及に向けて」、第 6 回開催については第 4 章 2. 「電力系統・安定化関連」において概説する。

3.4.1 くらしからの省エネを進める政策デザイン研究国際ワークショップ～英国グリーンディール政策を参考に～

2014 年 2 月 24 日 @ 学士会館²⁸⁾

本ワークショップは、日本で初めて、グリーンディールの担当行政官を招聘して行ったものであり、文部科学省・英国大使館の後援を受けて実施した。

ワークショップは 3 部構成であり、第 1 部「英国の取組と課題」として、アラン・クリフォード氏（英：エネルギー気候変動省）からグリーンディール政策の枠組みについて、ジョナサン・ハーレー氏（英：グリーンディール登録管理機構）からグリーンディール政策の実態について、講演いただいた。2 名の講演を通じ、WEB サイト等文献情報からは伝わらない政策過程や、現場の状況が伝わり、政策が実際に動いていることが参加者にも感じられたことと推察する。

第 2 部「日本の取組と課題」では、経済産業省、環境省、国土交通省から、各省が実施する省エネ政策の現状について、講演いただいた（経済産業省環境政策課 課長補佐 森川純氏、環境省 地球温暖化対策課 課長補佐 増田大美氏、国土交通省 住宅生産課 課長補佐 宮森剛氏）。経済産業省からは、CO₂ 削減に価値を付け国内で売買を可能とする J-クレジットの枠組みについて、環境省からは、診断員が家庭に向いてエネルギー消費実態を調査し、省エネ策をアドバイスする家庭エコ診断について、国土交通省からは住宅・建築物の省エネルギー施策についての講演であった。省庁ごとの省エネルギーについての取り組みについて、多角的アプローチによる施策が着実に進行していることが理解できる内容であった。

第 3 部としては、LCS 研究統括／東京大学工学系研究科教授 松橋隆治より、グリーンパワーモデレータの創出を軸とする提案政策の概要説明を行った。省エネ推進に関わる各省の取り組みを横断的につなげて政策デザインを行うことで、電力自由化の環境下において、有効な省エネ・再エネ進展、更には系統安定化に資する新事業が展開可能であることが示された。

このワークショップを開催することで、日英の政策担当者が一堂に会し、日本の家庭における大幅な省エネルギー進展のための包括的な政策を考えるための議論と意見交換をする場を設けることができた。また、ワークショップが契機となって、翌日に、駐日英国大使館が日本の各省・学会の専門家と、招聘者 2 名との意見交換会を開催するに至った。

ワークショップでは、日本に適したデザイン、家庭への与信問題、リース等によ

²⁸⁾ <http://www.jst.go.jp/lcs/result/ws20140224/index.html> 参照。

る高い手数料・利子の問題等が、課題として明らかになった。

3.4.2 初期投資ゼロ金融による省エネ・再エネ事業推進枠組みの現状と課題

2014 年 7 月 16 日@JST 東京本部別館

第 1 回の英国での事例、そして英国担当官と日本の行政官、研究者、実務者の対話を受け、日本での枠組みをより深掘りするためのセミクローズドのワークショップとして実施した。日本における初期投資ゼロでの低炭素化事業を実施する事業者や、金融機関、そして、LCS で検討しているスキームでの活用を想定している J-クレジット、家庭エコ診断の担当者を招聘した。参加者は声掛けした関係者のみであり、公開議論としないことによって、深掘りした議論を可能としようという試みであった。通常は対話のない事業者間、事業者と金融機関、省庁の担当者（文部科学省、経済産業省、環境省より参加、経済産業省は J-クレジットについて、環境省は家庭エコ診断について講演）の間の対話、情報共有を促進することができた。

第 1 部は、「初期投資ゼロ金融による省エネ・再エネ事業の現状と課題」の副題のもと、実際に初期投資ゼロでの事業者の省エネプロジェクトを「変動型リース」にて行うエナジーバンクジャパン株式会社代表取締役社長 境内行仁氏より、「中小企業・自治体向け初期投資ゼロの省エネ・再エネプロジェクト運営の経験と課題」のタイトルで講演いただいた。変動型リースとは、省エネまたは発電によるメリット金額に応じて、リース料金を支払うシステムであり、同社が特許を取得している。同社は中小企業向けに事業を実施しているが、家庭を対象とする場合、リスクは保険の形で分散させる形であれば、事業として可能であろうとの見解を得た。また、家庭向けに蓄電池リースを行っている ONE エネルギー株式会社 鶴田真紹氏より、「家庭向け蓄電池リース事業の経験と課題」とのタイトルで講演いただいた。同社が再生可能エネルギー大量導入時代に向けて、家庭への蓄電池普及に力を入れた結果、魅力的な料金プランが可能となった経緯について説明をいただいた。昼夜の料金差に加えて、メニューの見直しまで行った場合、リース料金を上回る節約メリットが得られた家庭もあったとのことである。一方で、家庭向け蓄電池リースは戦略的事业であり、単体での黒字が難しく、リース期間である 10 年以降は蓄電池を家庭から回収するなどの努力も行っている。

第 2 部では、「金融の仕組みを活用した省エネ・再エネを支援する政策」との副題のもと、まずは国内の自主的温室効果ガス削減クレジットである J-クレジット制度について、担当省の経済産業省産業技術環境局 環境政策課 環境経済室 課長補佐 善明岳大氏より「J-クレジット制度による家庭の省エネ・再エネ事業の紹介と展望」とのタイトルで講演をいただいた。また、類似するクレジット創出案件については、プログラムとして登録すればプロジェクト件数の追加が容易となるプログラム型 J-クレジットについて、実証実験を行った経験について、株式会社住環境計画研究所 所長 鶴崎敬大氏より「国内クレジット プログラム型事業の経験と今後への課題」と題して講演いただいた。最後に、家庭エコ診断事業について、環境省 地球環境局 地球温暖化対策課 課長補佐 井戸井毅氏より「家庭エコ診断制度の進捗と展望」と題して講演いただいた。

第 3 部は、参加者によるディスカッションを、LCS 研究統括／東京大学工学系研究科教授 松橋隆治のファシリテートにより実施した。参加したからは、集合住宅のようなまとまった単位から実施することの提案があったり、再エネを選ぶことを促すインセンティブとなる制度が必要である等の意見があったり、参加者による活発

な議論が行われた。

なお、参加者は、電力会社、ガス会社、商社、ビル管理会社、金融機関、行政官、研究所等専門家の 40 名程度であった。

3.4.3 初期投資ゼロの「電気代そのまま払い」実証実験と今後の展開・課題

2015 年 3 月 18 日@学士会館²⁹⁾

本ワークショップは、実証実験が始まった電気代そのまま払いについて主体となる事業者や自治体担当者を招き、自治体や事業者の状況について情報共有しながら議論を進める招待制の非公開会合として実施した。

第 1 部は、「『電気代そのまま払い』実証実験のご紹介」と題し、実証実験実施主体となっている下川町（北海道）の仲埜公平氏、静岡ガスの大津浩子氏より、実証実験の概要について講演いただいた。

第 2 部は、「健康メリットによる断熱改修経済性向上は可能か」の副題のもと、独立行政法人建築研究所理事長 村上周三氏より「断熱改修による健康メリット」と題した講演をいただいた。投資回収年数が 60 年を超えるといわれる断熱改修であるが、健康メリットを定量化して考慮することで、20 年程度となりえる概算について、また、そのような概算を保険に反映するための実験について紹介いただいた。

第 3 部は、「自治体の省エネ・再エネ事業への取組の現状と課題」の副題のもと、下川町役場 仲埜公平氏、水俣市役所 清水智恵氏より、自治体における省エネ・再エネ事業への取り組み全般について紹介いただき、その後、参加していた自治体職員より、それぞれの自治体における取り組みを紹介いただいた（つくば市、足立区、神奈川県、遠野市）。普及啓発ではなく、実際の CO₂ 削減に結び付く施策の実施は、自治体だけのマンパワーでは難しく、現在は補助金の助けによって成立しているが、民間の活用を進めることが重要であるとの議論となった。

²⁹⁾<http://enesys.t.u-tokyo.ac.jp/coi/information/284/>参照。

人材育成の必要性

大幅な低炭素化を行う場合、再生可能エネルギーの大量導入と大幅な省エネは必要不可欠である。再生可能エネルギーの大量導入の際に電力システムに必要となる変革については、技術的には可能であるが、ステークホルダーが納得できる負担の枠組みを構築することが重要な課題である。省エネルギー政策については、既に耐用年数内にメリットが出る技術があっても、初期投資を重く感じる心理的障害や、小さな単位の省エネをビジネスにしても費用ばかりかかりメリットが生じにくいといった事情によって導入が進んでいない。

つまり、個別技術を開発すればすべてが解決する課題ではなく、個々のステークホルダーの間を調整し、win-win となる解決策をデザインし、コミュニケーションをとることが、課題解決の肝となる。このようなことのできる人材については、個々の分野の専門性に加えて、専門家の間をつなぎ、全体をデザインできるプロデューサー的能力が必要とされる。同時に、こうした人材に対して、正当な評価が得られる枠組みについても、今後構築することが重要である。

LCS では、「明るい低炭素社会」に向けた、定量的技術システム研究（個別エネルギー技術・システムのコスト、CO₂排出量の見通し等）、定量的経済・社会システム研究、及び低炭素社会システム構築による新しい研究課題の抽出や、他のいろいろな分野・組織の人達との議論を通じた社会シナリオの提案に結びつける実務の中で、人材の育成に努めている。

第 4 章 低炭素社会システムの構築

第 4 章では、低炭素技術の普及・拡大によって変革した社会経済の姿とはどのようなものかを、定量的にモデル分析する。また、再生可能エネルギー拡大に必要な、新しいインフラ整備や市場、そこに求められる制度について議論する。

「明るく豊かな低炭素社会」の実現に向けて、低炭素技術のイノベーションと低炭素技術の導入・普及を促すためのイノベーションを適切に組み合わせ、低炭素社会システムの構築につなげていくことが求められる。LCS は、定量的技術システム研究と定量的経済・社会システム研究の各々を展開し統合的に推進する。具体的には、革新的技術を含む低炭素技術について、性能やコスト、CO₂ 排出削減効果等の将来の技術進展とそれによる経済活性化の見通しを低炭素社会システムの構築に反映させ、社会実装に向けた取り組みで得られた知見・データを取り込み、総合的に検証する。このような流れで定量的技術システムと定量的経済・社会システムの統合モデルシミュレーションの開発と活用を進める。低炭素社会システムの社会実装の実効性を高めることを目的に、産業構造や社会構造、生活様式、技術体系等の相互関連や相乗効果の変化・影響を評価し、シナリオに反映させる。社会実装の観点からは、地域の低炭素化と「良い」暮らしが同時に実現される仕組みを設計するための検討を行っている。地域特性が活かされ、地域産業の振興・雇用創出等により地域経済が活性化することが望ましい。低炭素技術導入のための短期的な誘導策に頼らずに、低炭素化に向けた取り組みが経済的に自立したものに発展することが重要である。それら地域の取り組みの経済性の高さをもって国全体として大きな力が発揮できる。

更に、低炭素技術を組み合わせた、低コストで安定的な需給を実現する電力・エネルギーシステムを比較・検討する。特に、再生可能エネルギー導入のために解決すべき「送電網の強化」に向けた課題について分析を進め、提言を行う。併せて低炭素技術を海外に展開し地球規模で低炭素化を目指す国際的な取り組みの進め方の検討について紹介する。

4.1 低炭素社会実現のための統合モデルシミュレーション

低炭素社会実現のための統合モデルシミュレーションは、性能や経済性に優れた低炭素技術やシステムが開発され、それらの導入を促進する制度によって普及した場合の「明るく豊かな低炭素社会」のシナリオを開発することを目的とする。

定量的技術システム研究と定量的経済・社会システム研究の統合化には、定量的技術システム研究の基盤である低炭素技術設計・評価プラットフォームと経済モデルとを接続し、低炭素技術に関するデータ（技術開発の実現年度と当該技術の性能、コスト等）が経済モデル中で矛盾なく用いられることが重要である。

次に、一般消費者が革新的省エネ技術を導入する省エネ行動の普及の障壁を定量化する。この定量化には、行動経済学における限定合理性や社会心理学に基づく分析が必要である。また、省エネ行動や省エネ技術の普及を妨げる障壁を克服する制度を設計し、その制度を施行した場合の効果を定量的に評価する。更に、この評価結果が統合モデル内で矛盾なく用いられるようにする。

最終的には、これまでに開発を進めてきた最終需要評価、経済循環、電源構成評価の各モジュールを統合し、限定合理性を考慮できる整合性のとれた全体モデルとして組み上げる。

統合モデルシミュレーションにより、定量的技術システム研究と定量的経済・社会シ

システム研究の成果を反映した低炭素社会システムが、日本の経済と国民生活に与える効果を定量的に表すことが可能となり、これが「明るく豊かな低炭素社会」のシナリオとなる。

4.1.1 エネルギー需要見通しから見る低炭素社会に向けた課題と展望

【LCS 提案書番号：FY2015-PP-16】³⁰⁾

2013 年度の最終エネルギー消費は 2005 年度比 10.8%減少した。この事実は、これまでのエネルギー・気候変動対策の効果があったと考えられ、また、このことは、将来のエネルギー需要にも少なからず影響を与えるものと考えられる。そこで、低炭素技術の普及による経済的・社会的な影響を評価することを目的に、日本のエネルギー需要予測モデル（以下、エネルギー・モデル）を構築し、このモデルを用いて現在までの省エネトレンドを踏まえた将来のエネルギー需要予測を行なった。

(1) はじめに

化石エネルギーの消費抑制と経済的な豊かさを両立した「明るく豊かな低炭素社会」を実現する重要な要素の 1 つが低炭素技術である。これまで、LCS はエネルギーシステムに関連する低炭素技術の普及の展望を示してきた。これらの展望を実現させていくには、低炭素技術が普及した社会の姿を評価することも重要である。その理由は、「明るく豊かな低炭素社会」を実現させるために社会的コストが発生するならば、そのコストを超える効果（あるいは便益）を低炭素技術が普及した社会の姿から見出すとともに、社会的コストの負担を納得させる必要があるからである。

このためには、社会・経済的要因とエネルギー技術を結びつけた上で将来のエネルギー・環境への影響を評価する手段が必要である。今回、将来の日本のエネルギー需要を評価するモデルを構築し、将来のエネルギー需要について考察した。エネルギー・モデルは、産業部門（12 部門）、業務部門、家庭部門、運輸部門（旅客部門、貨物部門）の各々の部門について、石炭、石油、天然ガス、電力、熱・再生可能エネルギーのエネルギー源ごとにエネルギー需要の構造を表す方程式を求め、それらを連立方程式体系として構成されたものである。エネルギー・モデルにおけるエネルギー需要の構造を表す方程式は、2013 年までの部門別・エネルギー源別のエネルギー原単位と社会・経済的要因を表す変数の関係を推計して求めた。この連立方程式体系を解くことによって、将来のエネルギー需要の予測値が計算される。

(2) エネルギー需要の現状と将来

我が国は、東日本大震災以前からエネルギー安全保障・気候変動問題への対応を図ってきた。震災後は国内の原子力発電所の稼働停止もあり、引き続き再生可能エネルギーの導入や省エネルギーの推進を進めている。2013 年度の最終エネルギー消費は 2005 年度比 10.8%減少しており[1]、これまでの取り組みは、エネルギー消費の減少という形で現れている可能性があり[2]、将来のエネルギー需要にも少なからず影響を与えるものと考えられる。

そこで、エネルギー・モデルを利用し、最終エネルギー消費が減少している現状を踏まえ日本のエネルギー需要を計算した。エネルギー・モデルの構造方程式は、社会・経済的要因とエネルギー技術の関係を 2013 年までの統計データから推計したものであり、現状のエネルギー消費構造を捉えていると考えることができる。

³⁰⁾本項目では、LCS 提案書(FY2015-PP-16)を中心に概説する。LCS 提案書番号については巻末を参照。

将来予測に必要なモデルで決定できない変数については、長期エネルギー需給見通しにおけるリファレンスケース³¹⁾の中の経済・社会構造や電源構成に関する前提条件を用いた[3]。具体的には、2030 年までに経済は堅調に回復するとし、実質 GDP が年率 1.7%で成長する等の条件をエネルギー・モデルに与え、2030 年までの日本のエネルギー需要を予測した。

(3) 将来のエネルギー需要予測

予測計算によれば、エネルギー原単位の改善が進む中で、最終エネルギー消費の減少が期待される。図 4-1(a)は 2030 年までの部門別エネルギー需要の推移を示したものである。最終エネルギー消費は、全体で 2013 年比約 5%減の $304,081 \times 10^{10} \text{kcal}$ となる。最終エネルギー消費を部門別に見ると、産業部門と運輸部門において同年比 10%程度の減少となるが、業務部門の最終エネルギー消費は同年比約 13%増加する（図 4-1(a)）。

CO₂ 排出量は 2013 年度比で約 16%減少すると見込まれる（図 4-1(b)）。発電部門からの CO₂ 排出量は、ゼロエミッション電源の割合が 2030 年で 4 割を超えるという長期エネルギー需給見通しの想定を利用している点に留意する必要がある。

今後、電力需要が増加する一方、低炭素な天然ガスの消費割合が増加すると見込まれることから、将来の CO₂ 排出量は減少するという結果となった。しかし、この結果は、我が国の化石燃料の燃焼から排出される CO₂ 排出削減目標（2013 年度比で 25%減、ただし、温室効果ガスは同年比 26%削減である。）に及ばない³²⁾。今後、最終需要部門におけるエネルギー原単位の改善が現状のまま維持されるとしても、日本経済が堅調に推移すれば、我が国の CO₂ 排出削減目標を達成する可能性が低いと考えられる。

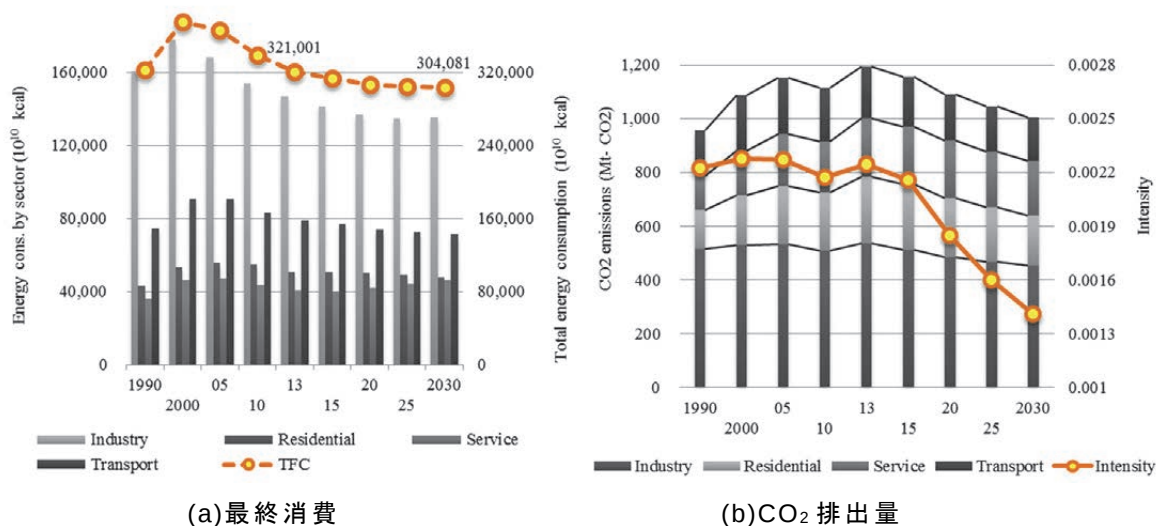


図 4-1 エネルギー需要予測の結果

³¹⁾ 長期エネルギー需給見通しでは、省エネ対策の効果を考慮した省エネ徹底ケースとリファレンスケースの 2 つのエネルギー需要予測結果が示されている。

³²⁾ 本分析と排出削減目標で用いられた 2013 年の化石燃料の燃焼から排出された CO₂ 排出量（実績）データが異なることに留意されたい。これは、基となる化石燃料の消費量データが異なる事からである。

(4) エネルギー原単位の改善効果

本予測分析は、文献[3]のリファレンスケースと整合的な経済・社会構造に関する前提条件の下でエネルギー需要を計算した。これは、エネルギー・モデルを利用し、最終エネルギー消費が減少している現状を踏まえた将来のエネルギー需要を予測する本分析は、長期エネルギー需給見通しにおいて省エネルギー対策の効果を考慮しないリファレンスケースに相当するという考え方に基づくものである。

エネルギー消費量を活動量とエネルギー原単位の積で定義すれば ($E_t^i = (E_t^i/EA_t^i) \times EA_t^i$, EA_t^i は部門iの活動量, E_t^i は部門iのエネルギー消費量である)、本分析と長期エネルギー需給見通しのリファレンスケースの間で、これらの前提条件を合わせることで、両者におけるエネルギー需要予測の違いはエネルギー消費原単位の違いによるものであると考えることができる。そこで、本予測分析と長期エネルギー需給見通しにおけるリファレンスケースから計算したエネルギー原単位 (E_t^i/EA_t^i) の比較を通して、両者のエネルギー需要予測結果の違いを確認する。

図 4-2 は、実績 (2010 年から 2013 年)、本予測分析 (2013 年から 2030 年)、及び長期エネルギー見通し (2013 年から 2030 年) におけるエネルギー原単位の増加率の比の自然対数値を示したものである ($\ln((E_t^i/EA_t^i)/(E_0^i/EA_0^i))$ 、 t は期間終了年、 0 は期間開始年)。部門別に見ると、産業部門と運輸部門において原単位の改善がエネルギー消費の減少に寄与していることがわかる。また長期エネルギー需給見通し[3]との比較から、これらの部門では、それぞれ原単位が改善するという見通しは一致するが、その大きさは本エネルギー・モデルの方がいずれも大きいことがわかる。一方、業務部門では、エネルギー・モデル及び長期エネルギー需給見通し共に、原単位要因がプラス (悪化) するという結果となった。また、家庭部門におけるエネルギー原単位要因は、エネルギー・モデルの予測結果が「長期エネルギー需給見通し」の結果で異なり、僅かにプラス (悪化) となった。

今後、我が国の経済は堅調に推移するとともに高齢化社会へと向かう中で、サービス市場の拡大が見込まれる。民生部門のエネルギー需要の増加する傾向が予想されるが、民生部門における将来の原単位の悪化は、エネルギー消費量を更に増加させる方向に働くと予測される。今後、民生部門におけるエネルギー原単位の改善が低炭素社会の構築に向けて重要になると考えられる。

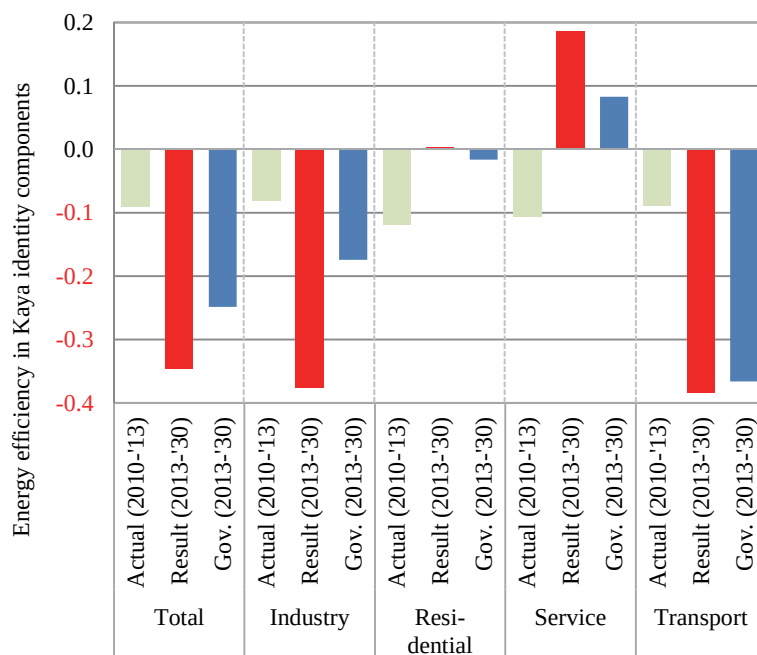


図 4-2 エネルギー原単位要因の比較

(5) まとめと提言

2013 年度の最終エネルギー消費は 2005 年度比 10.8%減少した。この結果は、これまでのエネルギー・気候変動対策の効果があったと考えられる。そこで、現状のエネルギー消費を踏まえ、2030 年までのエネルギー需要を予測分析したところ、エネルギー効率改善が引き続き維持されとしても、我が国の化石燃料の燃焼による CO₂ 排出削減目標に及ばない可能性があることが示された。

この結果から、これまでの我が国のエネルギー・気候変動対策は、一定の効果を上げているものの、現在の排出削減目標を達成するには不十分である可能性があると言える。従って、追加的な対策が必要であると考えられる。長期エネルギー需給見通しでは、産業・民生・運輸・発電部門における広範な対策が検討されている。これらの対策を着実に実施する事が重要であろう。

しかし、そのコストを考えた場合、優先して対策を行うことも考えておく必要がある。エネルギー・モデルの結果によれば、民生部門におけるエネルギー原単位が悪化するものと考えられる。従って、民生部門における対策を重点的に実施していくことが重要であろう。また、大規模な CO₂ 排出削減を行うには、産業部門における対策が依然として重要である。対策の一例として、民生部門におけるエネルギー需要の管理や、産業部門における低炭素技術の効率的な利用の拡大などが考えられる。これらは、LCS が重点的に取り組んできたものでもある。次項では低炭素社会の構築に向けた対策について検討する。

参考文献

- [1] 資源エネルギー庁（2015）「平成25年度（2013年度）エネルギー需給実績（確報）の概要」。
- [2] Sakamoto and Takase (2015) “Evaluation of Japanese Energy Policy When

Undergoing the Structural Change in Energy Demand”, JST 低炭素社会戦略センター ディスカッションペーパー, LCSFY-2016-DP-03.

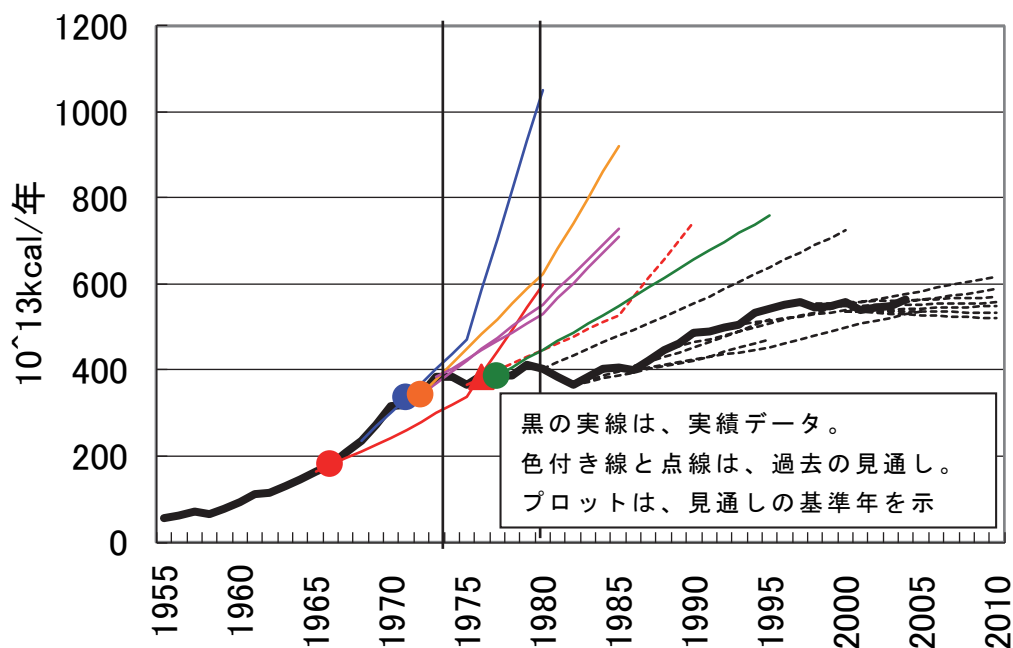
[3] 資源エネルギー庁 (2015) 「長期エネルギー需給見通し関連資料」.

4.1.2 低炭素社会を定量的に描くために～現行技術による低炭素化のポテンシャルと経済影響評価試算

【LCS 提案書番号：FY2014-PP-14】³³⁾

「問題は、未来が現在と違うことだ。もし、これまでと違う考え方ができなければ、かならず未来に驚かされるだろう。」³⁴⁾

多くの「見通し」や「予測」は、過去のトレンドから統計的に最もありうる未来を基準に計算を行う。しかし、特にエネルギーや経済の分野の予測は、当たらないものとして認知されている。図 4-3 は、過去の長期エネルギー需給見通しと、その後の実績を比較したものである。特に足元の成長率に左右されることがわかり、特に大きな構造変化のあった 2 回の石油危機（縦線で示してある）については、まったく織り込んでいない事象であったことがわかる。



出典：元日本エネルギー経済研究所藤目和哉氏より提供

図 4-3 日本の長期エネルギー需給見通しと実績の比較(一次エネルギー総供給)

一方、ロイヤル・ダッチ・シェルが、シナリオ法³⁵⁾を利用して、企業の長期プラ

³³⁾ 本項目では、LCS 提案書(FY2014-PP-14)を中心に概説する。LCS 提案書番号については巻末を参照。

³⁴⁾ ロンドンビジネススクール教授ゲイリー・ハメルの言葉として、以下の文献に引用されている。ウッディー・ウェイド(野村恭彦監訳、関美和訳)、「シナリオ・プランニング 未来を描き、創造する」英治出版株式会社(2013)。

³⁵⁾ 第二次大戦中から米空軍にて利用されていた OR 法にストーリーという形で定性的観点を加える方法であり、ランド研究所出身のハーマン・カーン氏がのちに公共政策等に利用。

シナリオの際に、OPEC 主導による石油価格高騰シナリオを 2 つのシナリオのうちの一つとして検討しており、石油危機を契機に世界第 2 位となった逸話は有名である。同社は、その後このシナリオ法を「シナリオプランニング」として発展させた[1]。

2050 年、または 2030 年に向かって「明るく豊かな低炭素社会」のシナリオを示すためには、今や少し前と同じ未来が続くと想定することはナンセンスである。よって、どのようなシナリオ分岐がありえて、どのような幅で我々はものを考えるべきかについて、まずはシナリオプランニングを実施する。これには、東京大学公共政策大学院角和昌浩氏の協力を得、まずは 2016 年 11 月に 30 人程度のシナリオプランニングセッションを東京国際交流館にて実施した。このセッションにおいて、いくつかのシナリオを導出した。

得られたシナリオを元に、前章に示したエネルギー・モデル、経済モデル、産業連関モデルを利用し、シナリオの定量化を試みる（図 4-4 参照）。特に、社会が変わることで、最終需要、特に家庭が何に支出を行うかが大きく変わる可能性がある。また、需要された財・サービスの生産構造が大きく変わる可能性がある。これには、電力や熱という財の生産において、再生可能エネルギー比率が多くなることも含まれる。また、鉄の生産において、リサイクル鉄の活用が進めば、粗鋼の生産は少なくとも済むことになる。加えて、シナリオにおいて考慮された環境変化をモデル想定として組み込むことになる。

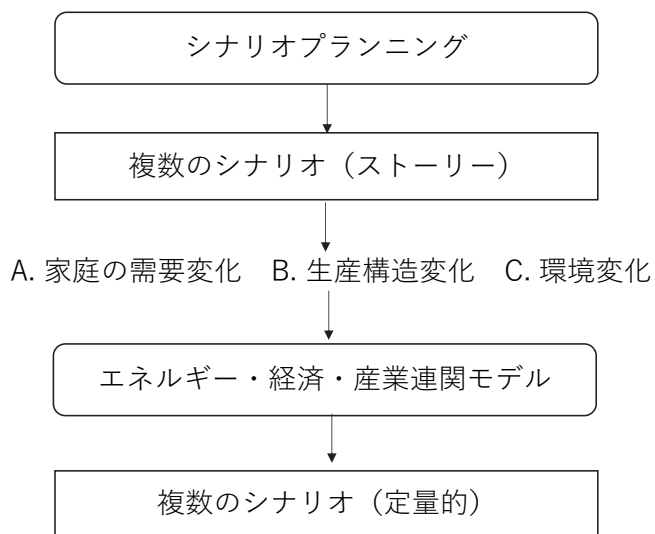


図 4-4 シナリオ構築と定量化の流れ（予定）

以下に、エネルギー・経済・産業連関モデルに組み込む様々な将来の要素として分類した、①家庭の需要変化、②生産構造変化について、経済モデルにおいて試算した結果を示す。2016 年 11 月に実施するシナリオプランニングによって得られる複数のシナリオをもとに、本試算結果のような流れで、定量化を実施することになる。

試算には、東京大学松橋隆治研究室・吉田好邦研究室にて開発、LCS において利用している日本経済の応用一般均衡モデル DALC（Model for Designing Affluent Low Carbon Economy）を用いた。2005 年産業連関表（確報）、国民経済計算年報を利用

し、産業部門は 39 部門、家庭の消費財は 19 財、家計は世帯の年間所得によって 18 階層に分類している（図 4-5 参照）。エネルギーについては、詳細な部門分割を行っている。モデルの詳細については、長田(2005)[2]を参照されたい。



図 4-5 DALC モデルの消費財・所得階層・産業部門の詳細

試算では、①家庭部門におけるエネルギー利用効率の向上(我慢ではない省エネ)、②エネルギー源の再生可能率の進展(今回は太陽光・風力発電の進展)、③産業構造のリユース・リサイクル化の進展(今回は鉄鋼部門における電炉比率の上昇)、の3種類の変化を考慮した。①はA.の家庭の需要変化に分類することができ、②・③はB.の生産構造変化に分類することができる。表 4-1 に、試算の概要を記述した。

表 4-1 試算における想定概要とモデルにおける扱い

	想定概要	モデルにおける扱い
①家庭の省エネ	自動車用燃料、光熱費が減少し、他の消費が増加する。	生産財・消費財変換行列(Cmatrix) ³⁶⁾ において電気代(財 3)・ガス代(財 4)・他の光熱(財 5)・自動車等維持(財 15)のうち石油製品部門への需要について、1/4 となる。家計出費減少分は、他の財需要に均等に配分されることから、家計の消費シェアパラメータは変更され、家計の可処分所得は、出費減少分増加する。Cmatrix による省エネのモデル分析方法については、高瀬(2012)[3]を参照されたい。
②再エネ進展	電源に占める再エネ(太陽光・風力)比率が上昇する。	電力部門の投入係数が変化し、2005 年実績火力の 3 分の 1 が太陽光発電に、3 分の 1 が風力発電になると想定した。電気機械部門における太陽電池モジュール製造小部門の増加については、今回は影響を反映していない。なお、価格によるシェアの変化ではなく、外生的に投入係数を変更している。
③産業のリサイクル進展	鉄鋼部門の電炉比率が上昇する。	鉄鋼部門において、転炉による粗鋼生産の半分が電炉によるものとなるよう、投入構造を変更した。なお、価格によるシェアの変化ではなく、外生的に投入係数を変更している。

今回の想定による計算では、日本の CO₂ 排出量は基準データ比で 30.5%減少するという結果が得られた。30.5%の構成は、17.8%が家庭の省エネ、12.5%が再生可能エネルギー進展、0.3%が鉄鋼リサイクル進展によるものであった。また、GDP は横ばいであったが、産業構造変化が示された。

- ① 家庭の省エネについては、LCS による試算[4]に基づき、各家庭の光熱費とガソリン代がそれぞれ 4 分の 1 になると想定した。その結果、電気、ガス、石油製品の需要が減少し、その分家計は他の財を消費することになる。経済波及効果は、電力等のエネルギー関連部門より、サービス産業の方が大きいことから、GDP は微増となる。
- ② 再生可能エネルギー進展については、本推計では、火力発電の 3 分の 1 相当が太陽光発電に、3 分の 1 相当が風力発電になったと仮定している。よって、文献[5]において個別に推計されている「太陽光発電部門」と「風力発電部門」の投入構造が、発電部門の投入構造により大きい影響を与えると仮定している。産業連関表において、産業部門の列は、その産業が生産を行うためにどのような原材料・サービス・賃金をどれだけ用いているかを金額で示したものであり、生産額(つまり列和)で割ることで、その産業が 1 単位生産する際にどれだけの投入が必要かを知ることができる。この係数ベクトルを「投入係数」と呼ぶ。図 4-6 に 2030

³⁶⁾ 生産財・消費財変換行列(Cmatrix)とは、家計の 19 財への需要が、それぞれの財についてどの産業部門(39 部門)の需要となるかを変換するためのものである。例えば、第 1 財の食料への 1 単位の需要は、約半分が食料品部門(第 7 部門)と農林水産部門(第 1 部門)への需要となるが、残り半分は、商業部門(第 32 部門)とサービス業部門(第 37 部門)の需要となる。家庭における最終需要の変化が、生産構造に変化をもたらすための変換行列である。この「生産財・消費財変換行列」は、産業連関表の詳細に部門分類がされている表より推計した。

年の電力部門内に所属する詳細部門の投入係数をまとめたものを示した。

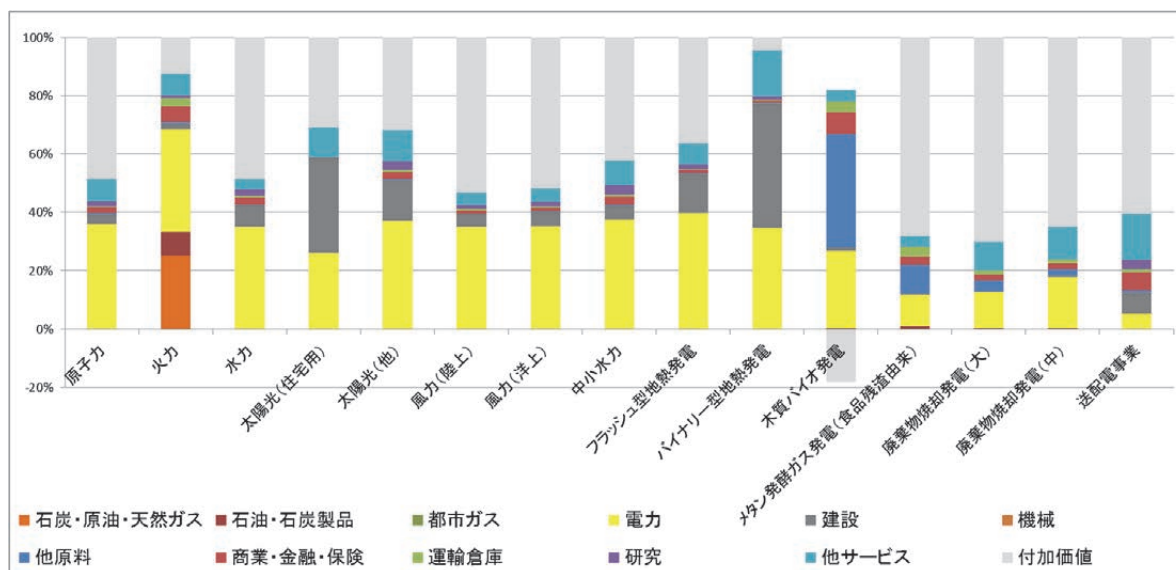


図 4-6 電力部門に所属する詳細部門の投入係数（文献[5]のデータを基に作成）

つまり、それぞれの発電方法による投入構造の違いを示したものである。なお、2005 年表と 2030 年表の投入係数は、文献[5]において同様との想定であった。石炭・石油製品・電力の生産が減少し、建設とサービス業（特に研究部門）の生産が増加する。付加価値率についての想定は変更していないことから、GDP はほぼ横ばいであった。

- ③ 鉄鋼のリサイクル進展については、基準年の転炉による粗鋼生産のうち 2 分の 1 が電気炉による生産に切り替わると想定している³⁷⁾。その結果、リサイクルした鉄を利用することから、鉄鋼の生産（粗鋼需要）が減り、電力の生産が増加する。日本全体での CO₂ 排出削減量は少ないものの、鉄鋼部門の CO₂ 排出量の 3.4%削減となった。

これら①～③の前提を同時に想定した場合、前述のとおり、日本の CO₂ 排出量は 30.5%減と計算された。GDP はほぼ横ばいであり、産業構造は化石燃料や電力部門の生産が減少し、その分サービス産業や食料品部門の生産が増加した。大幅な CO₂ 削減は、現行の技術の最大導入だけでも大きく進み、構造変化は伴うものの、経済活動水準には変化がないという試算結果となった。

なお、本試算には、今回の想定に含まれていない「太陽光・風力以外の再生可能エネルギーの進展」や、「鉄リサイクル以外のリサイクル進展」は考慮されていない。これらを考慮することで、より大きな CO₂ 排出削減を見込むことができる可能性がある。一方で、産業構造変化による付加価値率の変化や、雇用への影響、国際競争による影響については考慮しておらず、これらを考慮することでどのように結果に影響が出るかを検討する必要がある。

今後は、シナリオプランニングによるダイナミックな将来の構造変化を考慮した

³⁷⁾ 今回は、バージン鉱石からの鉄鋼生産と、電炉による鉄鋼生産について、そのコストは相殺し、よって市場価格にも変化はないと想定した。費用の構成のみが変化すると想定したことに留意されたい。コストの増減については、今後検討することが必要である。

複数のシナリオについて、上記のような定量計算を実施する予定である。

参考文献

- [1] ITメディア, “情報システム用語辞典,” (2008年),
<http://www.itmedia.co.jp/im/articles/0812/15/news136.html>.
- [2] 長田浩司, “気候変動に関する制度の不確実性を考慮した国内温暖化対策の影響評価,” 東京大学大学院新領域創成科学研究科環境学専攻, 2005, 修士論文.
- [3] 高瀬香絵, “低炭素社会実現のための住宅用太陽光発電導入の経済影響と普及政策に関する研究,” 東京大学大学院新領域創成科学研究科, 2012, 学位論文.
- [4] 低炭素社会戦略センター、年度報告書（平成24年度）、低炭素社会戦略センター(オンライン)、2013年4月(引用日: 2014年1月27日),
<http://www.jst.go.jp/lcs/documents/publishes/item/annualreportH24.pdf>.
- [5] 早稲田大学・スマート社会技術融合研究機構・次世代科学技術経済分析研究所、次世代エネルギーシステム分析用産業連関表(オンライン),
<http://www.f.waseda.jp/washizu/index.html>.

4.2 電力系統・安定化関連

「次期 5 年間事業計画案」に示したように、低炭素技術の進展・研究開発の方向性を提示する新たな取り組みとして、「エネルギー供給源の多様化に対応した、低炭素技術の統合的な評価」が重要な視点となる。すなわち、低炭素技術を組み合わせた、低コストで安定的な需給を実現する電力・エネルギーシステムを比較・検討する。特に、再生可能エネルギー導入のために解決すべき「送電網の強化」に向けた課題について分析を進め、提言を行う。具体的には、再生可能エネルギー大量導入に伴って生じる電力系統の周波数、電圧、過渡安定度の問題に対し、送電線、連携線の強化、系統制御技術の向上、蓄電池等の導入、需要側のデマンドレスポンスの導入による問題解決を検討する。

エネルギー供給源については、再生可能エネルギーに加え、火力・原子力等、幅広く様々な供給源を前提として、低炭素化・経済性・供給安定性、社会とのつながり・技術的可能性を含めて検討する。なお、原子力発電の比率・コスト構造等については、2030 年の電源構成（エネルギーミックス）について、経済産業省が中心となって検討が行われており、今後ともその他の意見も参考にしながら国全体で意思決定がなされるものと考えている。

4.2.1 再生可能エネルギー大量連系時における需給制御システムの提案

【LCS 提案書番号：FY2015-PP-17】³⁸⁾

近年、低炭素社会実現に向け、太陽光発電や風力発電といった再生可能エネルギーの大量導入に向けた動きが活発化している。一方、これらの電源の出力は気象条件に依存するため、導入によって系統の見かけの負荷変動は増大する。現在の電力系統需給制御においては、数十分程度以上の長周期の負荷変動成分を経済負荷配分制御（Economic load Dispatching Control, EDC）、数分から数十分程度の短周期成分を負荷周波数制御（Load Frequency Control, LFC）によって補償している。しかし、

³⁸⁾ 本項目では、LCS 提案書(FY2015-PP-17)を中心に概説する。LCS 提案書番号については巻末を参照。

太陽光（PV）・風力発電（WT）の大量連系時においては、従来の EDC 及び LFC システムでは需給偏差を補償しきれず、周波数変動が許容範囲を逸脱することが問題となる。特に、PV 及び WT の短周期の出力変動により、正味の短周期変動も増大する。また、EDC における負荷予測値に対して予測誤差が生じるため、LFC にて長周期の変動を補償しなければならない。そのため、これらの課題に対応できるような新たな電力系統の需給制御システムの構築が求められる。

LFC は EDC よりも短周期の負荷変動に対応するため、火力発電機の応動特性が重要であり、現在の需給制御においては、ボイラー応動の早い火力発電機（LNG 火力やガスタービンコンバインドサイクル（GTCC）火力）が EDC に加えて LFC を分担することが多い。しかし、再生可能エネルギー大量連系時においては、PV・WT の発電量により、火力発電機の運転台数が減少するため、現状は、ボイラー応動の遅さから EDC のみを分担されることが多い石炭火力機も LFC に活用していく必要がある。また、蓄電池（Battery Energy Storage System, BESS）に関しては、高速な応答性と高いランプレート（Ramp Rate³⁹⁾）特性を持つことから、LFC において高い周波数変動抑制効果が期待されており、また将来的にコストが低減されることが予想されるため、今後積極的に需給制御に活用されていくことが予想される。このように、再生可能エネルギーが大量連系された電力系統においては、火力発電機や蓄電池など、様々な応答特性を持つ LFC 電源を活用して、LFC 制御容量の確保及び LFC 信号の割り当てが行われなければならない。

ここでは、短周期変動増大への対策として、応答特性の異なる様々な LFC 電源が、将来的に LFC 制御容量確保のために用いられることを想定した、変動周期別 LFC 制御分担決定手法を提案した。次に、PV 及び WT 出力に予測誤差による EDC 制御残の増大に対しては、LFC システムより検知された周波数偏差をもとに、経済性を考慮した EDC 出力指令値補正を行う、新たな EDC と LFC の協調制御システムを提案した（図 4-7 参照）。そして、それらの提案手法の有効性を検証するため、東北電力管内を模擬した電力系統需給制御モデルを構築してシミュレーションによる検討を行った。

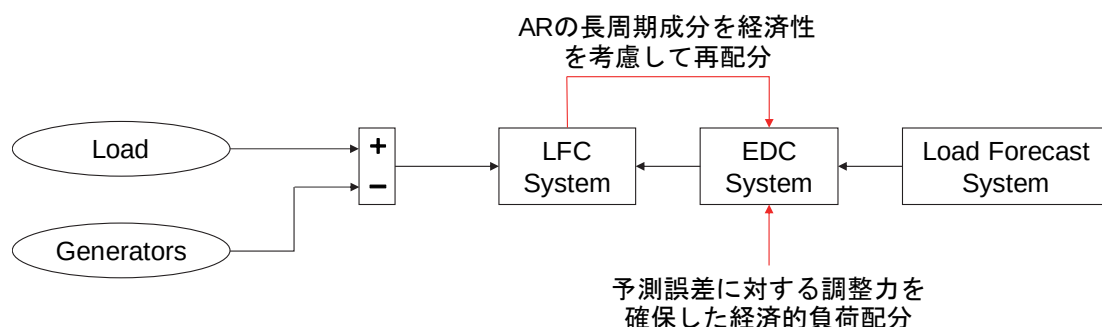


図 4-7 再生可能エネルギー予測誤差を考慮した EDC と LFC の協調制御システムの概念

(1) 需給制御シミュレーションモデル

本取り組みで用いる需給制御モデルについて簡単に述べる。本モデルは発電プラントモデル、起動停止（Unit Commitment, UC）計画モデル、EDC システムモデル、

³⁹⁾ 出力応答の変化速度。

LFC システムモデルから構成される。なお、火力電源種に関しては、1,000MW 級石炭火力プラント、700MW 級石炭火力プラント、250MW 級 GTCC 火力プラント、700MW 級 LNG 火力プラント、200MW 級 LNG 火力プラント、700MW 級石油火力プラント、250MW 級石油火力プラントの 7 種を考慮し、同一電源種の電源は同じ運用がなされると想定した。また、本取り組みでは、提案する需給制御モデルを用いてシミュレーション検討を行う。ここでは、需要が小さく、PV 出力が比較的大きい春期（GW 期）を想定した需給制御シミュレーションを行った。

本取り組みでは、再生可能エネルギーが大量導入された東北電力管内を想定した需給制御シミュレーションモデルを構築した。需要データは、東北電力から提供を受けた 2013 年 4 月 1 日～2014 年 3 月 31 日の 3 分平均値データを用いた。EDC で用いる 5 分平均値データは、20 分周期以上の各変動成分の 5 分間平均値を用いた。また、LFC シミュレーションの刻み時間は 1 秒としており、需要・太陽光発電量・風力発電量のデータに乱数を重畳させることで 1 秒刻みのデータを得ることとした。

(2) シミュレーション結果～LFC 制御分担

図 4-8 に各 LFC 電源による制御分担の一例を示す。短周期における LFC 分担の効果検証のため、ここでは再生可能エネルギー出力の予測誤差を考慮していない。この図は、特定時間断面における EDC あるいは各 LFC 電源による LFC の制御後に生じた制御残のパワースペクトル密度を示している。まず、EDC によって長周期成分が吸収されており、石炭火力及び水力がそれに続いて長周期成分を吸収していることがわかる。一方で、石炭火力は応答遅れのため、短周期変動に対して、制御分が少なくなっていることがわかる。また、BESS 及び GTCC は、長周期成分の残差と短周期変動を吸収している。このように提案手法によって各 LFC 電源の制御分担のすみ分けができていることが確認できた。

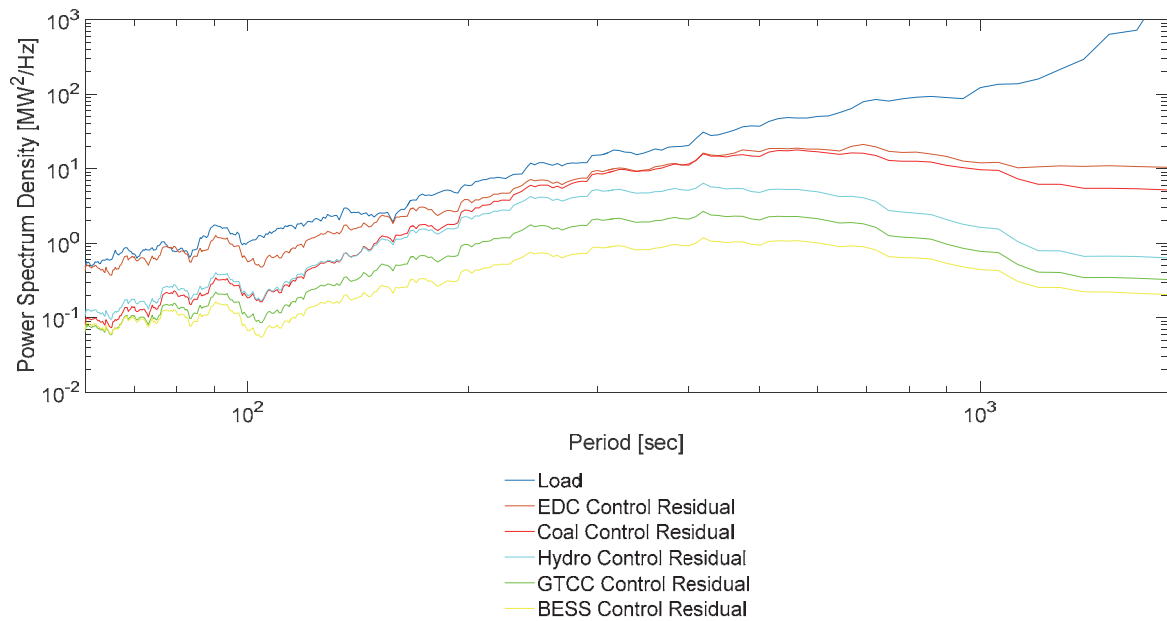


図 4-8 各 LFC 電源による制御分担

(3) 今後の課題と提案

低炭素社会の実現においては再生可能エネルギーの導入が大きな役割を担うと考えられるが、太陽光発電や風力発電などの、出力が変動し不確実性を有する電源の大量導入を実現するためには、既存の電力システムの改良が求められる。再生可能エネルギー大量導入時の、電力システムの特性を考慮しながら、経済性及び系統安定性を両立するような、電力システムを構築する必要があるだろう。

4.2.2 既存電源および電気自動車の活用を考慮した周波数調整市場の設計とその経済性評価

【LCS 提案書番号：FY2015-PP-19】⁴⁰⁾

第五次電気事業制度改革により大きな変換点を迎える我が国の電気事業において、送配電会社が LFC 調整力を十分に確保するための、新たな制度設計が求められることが、提案の背景にある。電力会社の発電部門と送配電部門の法的分離が行われると、発電設備を保有しない送配電会社は、相対契約等の手段を通じて、アンシラリーサービスを外部から調達しなければならない。新電力（特定規模電気事業者（Power Producer and Supplier, PPS））の参入や、再生可能エネルギーの導入が進む今日においては、調整力を市場調達することが有効と考えられる。また、運輸部門の CO₂ 排出を目指して、世界各国で EV の高い普及目標が掲げられているが、高い初期費用の参入障壁を理由に、普及が十分には進んでいない状況である。V2G（Vehicle to Grid）の機能を有する EV を購入して、周波数調整市場に参加した際に、系統への貢献の対価として得られる収益が、EV の普及を拡大させる効果について注目される。

ここでは、法的発送電分離、電力小売自由化が実施された後の日本を想定した、

⁴⁰⁾ 本項目では、LCS 提案書(FY2015-PP-19)を中心に概説する。LCS 提案書番号については巻末を参照。

負荷周波数制御（Load Frequency Control, LFC）調整力を調達する周波数調整市場を提案する。また、需要家側資源として電気自動車（EV）を活用し、周波数調整市場に参加した時の収益性を評価し、アンシラリーサービス料金によって、販売のシェアがどのように変化するか、定量的な評価を行う。

(1) 周波数調整市場の提案

発電事業者が提案市場へ参加する際に、発電機から LFC 調整力を提供する大まかな流れを説明する。はじめに、各発電事業者は、対象日の前日段階に、翌日の需要予測や再エネの出力予測に基づき、30 分単位の発電機起動停止計画を作成する。次に、起動停止計画で決まった火力機の出力状態に基づき、個々の発電機が LFC 調整を行うために要する追加コストを算出する。送配電会社はオファー価格の安いものから順に約定を行い、調整力が必要容量に達するまで調達を行う。以上の流れに沿って、取引及び入札を行うものとする。

シミュレーション対象として、東北電力管内を想定したモデル系統を用いる[1]（表 4-2 参照）。負荷変動は、東北電力が提供する 1 年間の実績値データを使用している。

表 4-2 モデル系統の電源構成

	Rated Capacity [MW]
Nuclear Power	1,925
Hydroelectric Power	1,978
Thermal Power	12,433
Coal	3,200
LNG	2,489
GTCC* ¹	4,861
Oil	1,883

*1, GTCC, ガスタービンコンバインドサイクル。

再生可能エネルギー電源は表 4-3 に示すように、Case.1 として 2015 年 10 月時点での系統連系済み設備容量を、Case.2 として東北電力による接続可能量算定値を設定し、これら 2 通りについて検討を行った[2]。

表 4-3 再生可能エネルギー電源の設備容量

	Wind [MW]	PV [MW]
Case.1	660	2,090
Case.2	2,510	5,050

起動停止計画は、優先順位法と動的計画法を統合した手法により作成している。まず、定格出力時の発電単価が安い順に発電機を起動し、必要発電量、運転予備力を満たす最低起動台数を決定する。次に、最低起動台数以上の何台の発電機を起動させるかの候補から、時間遷移に伴って起動費及び燃料費を考慮し、発電コストが最小となるルートを決める。この過程を繰り返すことで、各時間断面における起

動台数が一意に求まる。

(2) LFC 調整力の入札

算定した LFC 調整コストに基づき、調整力の入札を行う流れについて説明する。市場参加する各資源を、LFC 調整コストが安いものから順に積み上げ、累積量が必要 LFC 容量に達するまで入札を行う。必要 LFC 容量の決定は、時刻 t における総需要の 2%、太陽光出力の 5%と、風力定格容量の 3%を合計したものと設定した。積み上げた供給曲線と必要 LFC 容量の交点によって、時刻 t における周波数調整市場価格が決定される。

(3) 周波数調整市場における価格

図 4-9 は、Case.2 の一日 24 時間の周波数調整市場価格の変化を、季節毎、平日・休日別に各時間断面で平均したものを表す。再生可能エネルギー導入量が増加すると、必要 LFC 容量が増し、それによって市場価格が増加する。ただし、ピーク需要が低い季節に太陽光の出力が増加すると、需給運用において火力発電機が担う発電量が減少し、予備力を確保するために部分負荷運転の台数が増え、市場価格が下がるという結果も見られる。

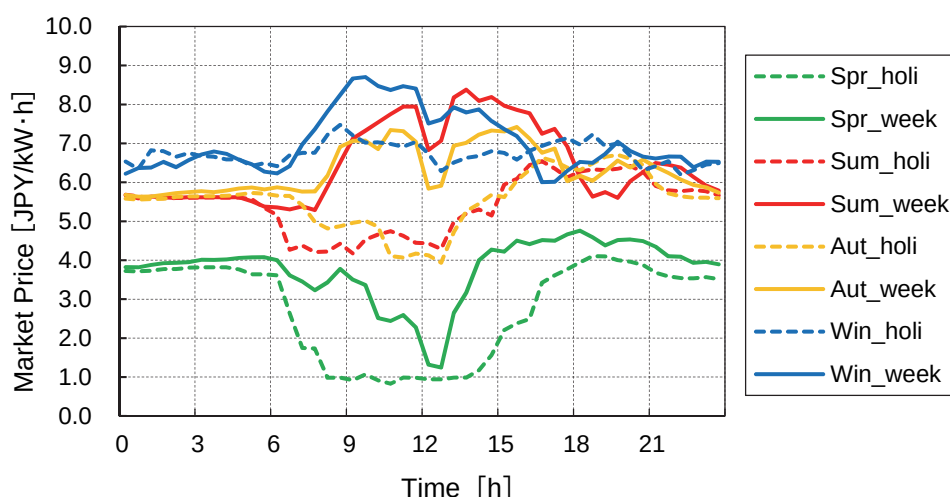


図 4-9 Case.2 の周波数調整市場価格
 (再生可能エネルギー電源は、東北電力による接続可能量算定値)

(4) 電気自動車 (EV) を活用した周波数調整市場への参加とその収益性評価

需要家側資源として電気自動車 (EV) を周波数制御に活用することを検討し、市場から獲得される報酬が、環境低負荷な電気自動車の販売を促進する、インセンティブとなる可能性について分析する。

図 4-10 の縦軸は、1 年間での EV1 台当たり獲得金額を表しており、EV の市場参加台数や再生可能エネルギー導入のケースによって、5 万～13 万円の報酬が得られる結果となっている。EV の市場参加台数が増えると、LFC 調整コストが高い火力機が追い出され、市場価格が下がり、獲得報酬も下がる結果となっている。Case.2 で再生可能エネルギーの導入量が増した場合、年間での総収益は Case.1 より増加している。

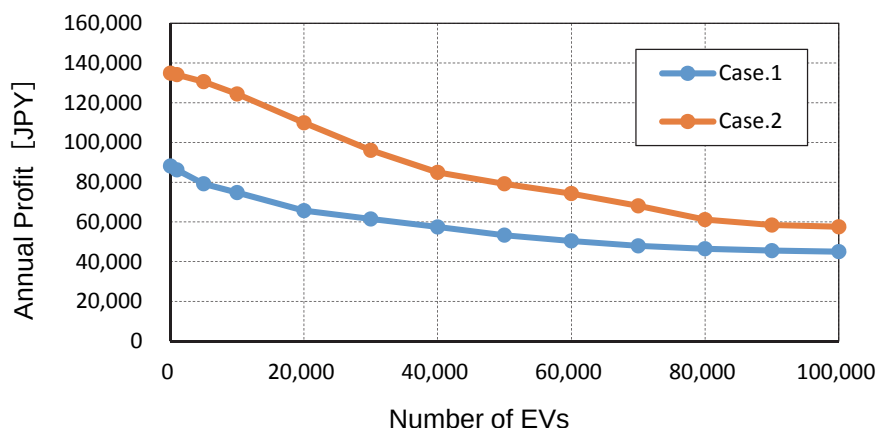


図 4-10 EV の市場参加台数の影響

(5) 今後の課題と提案

今後、我が国の CO₂ 削減目標の達成のために、電源構成に占める再生可能エネルギー電源の割合が増加することは確実である。一方、太陽光発電や風力発電は、急峻な出力変動を起こすため、大量導入時における系統安定性が不安視されている。特に、再生可能エネルギー電源が電源構成を占める割合が増加することで、従来の LFC（負荷周波数制御）の中心を担ってきた火力や可変速揚水発電の比率が減少し、周波数調整力が不足する事態が懸念される。こうした背景から、自由化後の送配電会社が周波数調整力を確保するための新たな制度設計が必要である。これには、蓄電池や電気自動車など需要側に存在する資源を系統に接続し、周波数制御に利用することが有力であるが、そのためには周波数調整市場を設計し、早急に開設しなければならない。

電力自由化が先行している欧米諸国を見ると、例えば米国の PJM⁴¹⁾におけるアンシラリーサービス取引の一環として、すでに周波数調整市場ができており、蓄電池や電気自動車が周波数制御に参画し、当該地域の電力系統の安定化に貢献している。一方、これらの需要側資源は、周波数調整市場への参画により、LCS 提案書(FY2015-PP-19)で述べたようなキャッシュフローを獲得することができる。

このことは、これらの技術の更なる普及を促進し、経済の活性化、再生可能エネルギーの普及促進、CO₂ の削減につながるであろう。

従って、我が国のエネルギー政策の一環として、周波数調整市場の早急な設計と開設が望まれる。

⁴¹⁾ PJM, Pennsylvania-New Jersey-Maryland の略。米国 13 州とワシントン DC 地域の電力システムを管轄しながら、卸電力市場も運営する独立系統運用機関（Independent System Operator, ISO）。送電線の所有権は電力会社が保持し、運用・管理は独立機関が行う。

参考文献

- [1] “電気事業連合会統計委員会 平成27 年度版 電気事業便覧,” 一般財団法人日本電気協会, 2015年.
- [2] “風力、太陽光の2015 年度算定値等の考え方および算出結果について,” http://www.meti.go.jp/committee/sougouenergy/shoene_shinene/shin_ene/keitou_wg/pdf/007_04_00.pdf, 2015年11月10日, 経済産業省, 2015年12月15日アクセス.

4.2.3 九州地域における太陽光発電大量導入と過渡安定度を考慮した電力システムの新しい経済的負荷配分制御の研究

【LCS 提案書番号：FY2015-PP-18】⁴²⁾

低炭素社会を目指す国際状況において、太陽光発電（PV）の割合は増加する傾向にあるが、PV の増加によって系統の安定性が低下することがわかっている。日本においても固定価格買取制度（FIT）の影響によって PV の発電量が増加しており、特に九州地域において顕著である。九州電力管内では、最大需要 15GW 程度に対して、PV の容量については、既存の導入量と FIT により認定され導入が検討されている分を合わせると 19GW 程度になっている。このような状況において、近い将来に PV が九州電力管内の系統の安定性に対して影響を与えることは明らかである。ここでは、PV が大量に接続されたときの安定性について考慮した経済的負荷配分について考察した。

本研究の手法は、大きく 2 つある。まず 1 つ目は、九州を 4 つの地域に分けて評価することで、地域ごとに PV がどの程度導入可能であるかの計算手法について提案すること。そして 2 つ目は、その手法を用いて主たる送電線ごとに過渡安定度を考慮した PV による有効電力に対する安定性の制約を与えた場合と与えない場合での PV の抑制量の違いを計算することである。

また、本研究の目的は、PV 大量導入時における、系統の安定性を考慮した経済的負荷配分モデルを開発し、そのモデルを用いて系統のマネジメント手法を提案することである。シナリオとしては、九州電力が発電設備接続可能量として掲げている容量である 8.17GW の PV が導入された場合の 5 月の第 1 週の週間電源運用計画を考える。

(1) 九州地域のモデル化

ここでは、九州の地区ごとに PV の導入量によって安定度がどのように変化するかを計算する手法を示すために、WEST30 機モデル[1]を参考にして、九州電力関内の送電線と発電機をモデル化する。公開されているインピーダンスマップ[1]から、実際に九州の地図に WEST30 機モデルを当てはめると図 4-11 のようになると推定し、LCS 提案書(FY2015-PP-18)ではこのモデルを用いて評価をする。

⁴²⁾本項目では、LCS 提案書(FY2015-PP-18)を中心に概説する。LCS 提案書番号については巻末を参照。

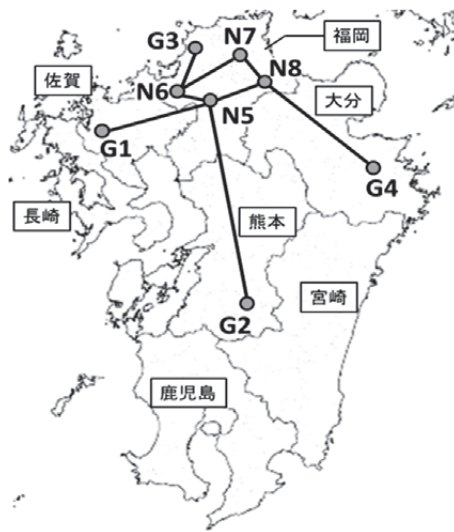


図 4-11 WEST30 機モデルから推定した九州のモデル

図 4-11 において、G1～G4 は発電機群を表し、N5～N8 は変電所のノードを表す。各発電機群のノードは、G1 が佐賀県と長崎県を合わせたもの、G2 が熊本県と宮崎県と鹿児島県を合わせたもの、G3 が福岡県、そして G4 が大分県の発電機の合計となっている。発電機群のノードは PV や風力発電（WP）を含む発電機と需要家を持ち、変電所のノードは需要家だけを持つ。

(2) 九州地域の評価の結果～経済的負荷配分モデルの比較

九州電力が発電設備接続可能量として掲げている容量である 8.17GW の PV が導入された場合の 5 月の第 1 週の週間電源運用計画を図 4-12 に示す。この節では過渡安定度の制約を与えない従来のモデルと、過渡安定度の制約を与える提案手法の両方の結果を示す。それにより実際に PV の出力が抑制され、他の電源の出力がどのように変化したかを示す。図から過渡安定度の制約を与えることによって PV の出力が実際に抑制されていることがわかる。そして、制約を加えることによって、日中においては揚水式発電（PmHD）の出力が減り、その分ガスコンバインドサイクル（GCC）の出力が増加していることがわかる。

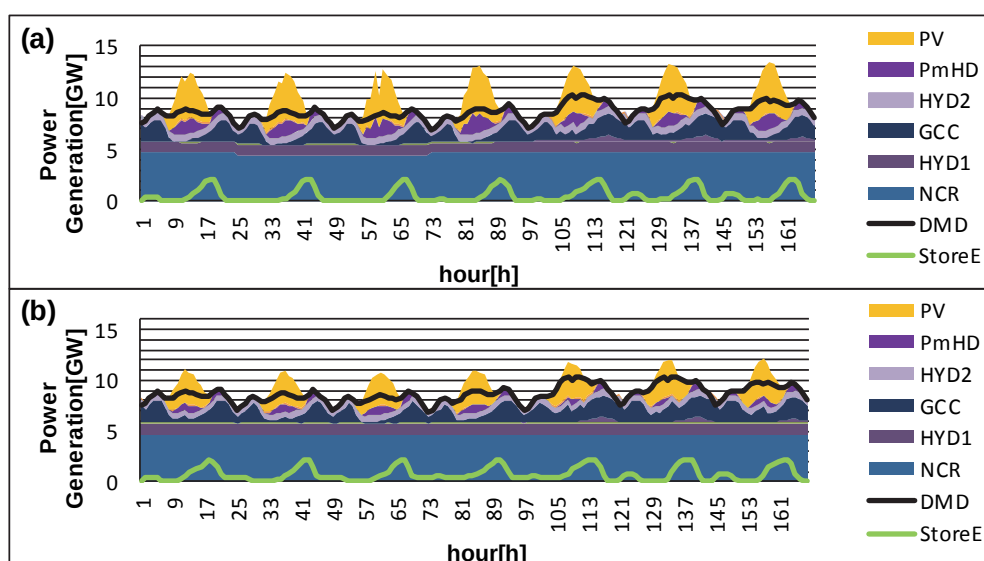


図 4-12 求めた週間電源運用計画 (a) 過渡安定度の制約なし (b) 過渡安定度の制約あり
(PV, 太陽光発電、PmHD, 揚水式水力発電、HYD2, 貯水池式水力発電、GCC, ガスコン
バインドサイクル、HYD1, 自流式水力発電、NCR, 原子力発電、DMD, 電力需要、
StoreE, 揚水式水力発電の貯水量)

ここでは PV の抑制量を取り出して議論をする。図 4-13 に発電機群ノード G3 及び G4 の PV の出力の抑制量を示す。G1 と G2 では抑制が起らなかったため、図には示していない。G3 においては全ての日において PV の出力の 80%以上を抑制してしまう結果になった。これは G3 のノードが LNG 火力と石油火力で構成されたとしたが、図 4-12 の結果ではその 2 つの発電がなされず、同期機の出力が小さいため、許容される PV の出力が極端に小さくなった結果だと説明できる。

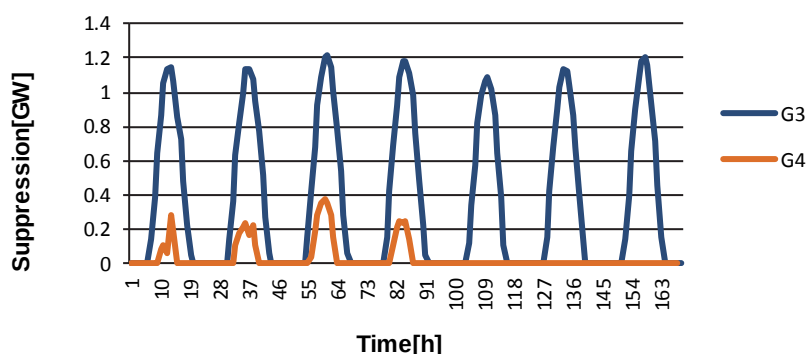


図 4-13 各発電機群ノードでの PV の出力の抑制量 (G1 と G2 は抑制なし)

(3) 今後の課題と提案

再生可能エネルギーが系統に大量に接続された状況においては、現在とは異なるマネジメントをする必要がある。そのような状況を踏まえ、ここでは太陽光発電大量導入時において安全面の立場から過渡安定度を考慮した系統のマネジメント手法の提案をした。

九州を 4 つの地域分けて評価した結果、特定の送電線に出力抑制がかかることがわかった。今後は出力抑制される G3 と G4 について水素エネルギーシステムなどの利用を提案する予定である。

4.2.4 燃料電池設置型一括受電集合住宅において電力融通を行う際の経済性の評価 【LCS 提案書番号：FY2015-PP-10】⁴³⁾

昨今の低炭素社会を目指す取り組みの中で、燃料電池への期待が高まっている。燃料電池は一戸建て住宅への導入は進んでいるが、全国で 41% を占める集合住宅での導入はあまり進んでいない。理由の一つとして、一般的に、集合住宅では一戸建て住宅よりも電力需要が少なくなる傾向があるため、燃料電池の稼働率が低下傾向になることが考えられる。これに対し、集合住宅内でエネルギー需要の異なる各戸に設置した燃料電池が、発電した余剰電力を住戸間で融通しあうことができれば、燃料電池の稼働率を向上させることが可能となる[2]。また、マンション全体で電力会社と高圧一括受電契約を行うことで電気料金を低減させるとともに、マンション内の各家庭に売電する際の電気料金を自由に設計することができる。

ここでは、高圧一括受電を採用したマンションの需要を想定し、そのマンションにおける電気料金体系と、各家庭のエネルギーコスト削減量についての関係を調べ、電気料金と電力を融通した際の売電価格に関する検討を行った。また、この結果を用いて燃料電池の経済性について検討した。

(1) シミュレーション

首都圏近郊の高圧一括受電と燃料電池の各戸設置を採用した 38 世帯マンションを想定して、予め与えられた需要に対して、混合整数計画法を用いてマンション全体でのエネルギーコストの最小化を最適化の目的関数としたシミュレーションを行い、各家庭での燃料電池発電量や各家庭がマンション内系統に電力を融通する量を決定する。その後、最適化された各家庭のエネルギー需要や融通量をもとに、電気料金や融通料金を変化させ、「ゲーム理論の概念」に基づく各家庭のエネルギーコスト最小化を行った。

対象とするマンションは、一世帯の面積を 80 から 100 平方メートル程度と想定し、国土交通省の推計[4]を用いてマンション内の世帯人数構成を決定した。合計 190 世帯分の需要データを作成し、38 軒分のデータをランダムに抽出した。マンションでの需要は夏期、中間期、冬期の 3 パターンを用意し、また電力需要は各季節で休日と平日の 2 パターンとして、計 6 パターンを用意した。結果を表 4-4 に示す。

⁴³⁾ 本項目では、LCS 提案書(FY2015-PP-10)を中心に概説する。LCS 提案書番号については巻末を参照。

表 4-4 マンション全体のエネルギー削減効果

	夏期		中間期		冬期	
	平日	休日	平日	休日	平日	休日
ピーク電力削減率	16%	7%	29%	44%	46%	28%
電力需要 [kWh/day/house]	10.57	11.76	11.63	10.15	14.89	13.95
総融通量 [kWh/day]	227.67	219.76	189.99	286.33	197.6	265.76
CO ₂ 削減率	7%	3%	4%	11%	4%	6%
FC*運転時間	-16%	-29%	-10%	6%	9%	6%

*FC: Fuel Cell, 燃料電池

家庭から余剰電力の融通を行った場合は、融通を行わなかった場合に比べて、全ての場においてピーク時最大購入電力が低減された（表 4-4、ピーク電力削減率参照）。融通することでの電気とガスに起因する CO₂ の削減効果は年間で約 7% となった。マンション全体で年間約 6.1 トンの CO₂ 削減効果が得られることがわかった。通常の給湯器と系統電力に基づくマンションと比較すると、融通を行う場合には、電気とガスに起因する CO₂ の排出量は 19.7% 程度の削減効果がある。マンション全体では年間 20.5 トンの CO₂ 排出量が削減されたことになる。

(2) 今後の課題と提案

燃料電池の投資回収期間を短くすることは、今後の燃料電池の普及を促進していく上で非常に重要な課題となっている。①J-クレジット取引を利用した年間エネルギーコスト削減額を増加させるシステムの提案と②燃料電池販売価格の削減によって燃料電池の投資回収期間を短くするシミュレーションを行った結果、①J-クレジットは 2,000 円/t-CO₂ 以上で取引されるような取引市場が望ましいこと、②燃料電池の販売価格は補助金を含めて 1 台当たり 60 万円程度に抑えることが望ましいという結論が得られた。①を達成するためには、自治体を中心となって CO₂ 排出係数を下げる取り組みをすることで、J-クレジットの取引が活発になり、達成できると考えられる。②については燃料電池の製造コストを細部まで見直し、量産効果が生じて燃料電池のコストが低下するまでは、補助金によって生産を後押しする必要がある。

4.2.5 パリ協定を踏まえた再生可能エネルギー大量導入と電力システムのイノベーション

ビジョン主導型の研究開発プログラム COI との連携 WS
2016 年 9 月 26 日 @ 学士会館⁴⁴⁾

2015 年 12 月のパリ協定によって、日本を含む世界は、大幅な削減を実施する方向へ舵を切った。日本を含む世界各国が温室効果ガスの削減目標を提出し、日本においては、閣議決定された地球温暖化対策計画において、2030 年のみならず、2050 年における温室効果ガスの削減目標が示された。これらの削減目標から、電力システムには抜本的なイノベーションが求められている。一方、太陽光発電などの再生可能エネルギーのコストが急激に低下しており、世界各国で、電源構成における割合が急増している。日本においても再生可能エネルギーが大量導入した際には、電力システムの運用・制御について、これまでとは異なる技術や観点が必要である。また、電力市場が今後自由化し、小売の全面自由化、法的発送電分離が行われることから、アンシラリーサービスの制度設計も急務である。更に、燃料電池車における水素利用を始め、再生可能エネルギーが大量に導入した際には出力抑制ではなく、水素として貯蔵するという方策もあり得る。

COI と連携した本ワークショップ⁴⁵⁾では、自由化市場のもと、再生可能エネルギーが大量に導入した場合の電力システム運用・制御について、必要となる技術や経済的負担配分の方法について、実務者・研究者等を招聘し、講演・議論を行った。また、水素の製造・貯蔵・利用についても、最先端の知見を共有した。

第 1 部では、「再エネ大量導入時の電力システム安定化技術とアンシラリーサービス」の副題のもと、九州大学炭素資源国際教育研究センター教授 原田達朗氏より「再生可能電源導入とクラスター構想－九州地域での事業展開－」のタイトルで講演いただいた。日本の温室効果ガス削減目標を達成するためには、電力の低炭素化だけではなく、家庭が主体的に省エネをすることを促す枠組みが重要であり、その枠組みの提案をいただいた。また、高瀬香絵 LCS 特任研究員(東京大学工学系研究科 客員研究員)からは「米国カリフォルニア州の再エネ大量導入対応についての調査報告と日本の未来」のタイトルのもと、2016 年 9 月に米国カリフォルニア州の独立運用機関であるカリフォルニア ISO(Independent System Operator), CAISO を中心に訪問調査を実施した内容について、特に広域での最適経済負荷配分を行うエネルギー・インバランス市場(Energy Imbalance Market, EIM)、蓄電池設置義務について説明した。吉岡剛 LCS 特任研究員(東京大学工学系研究科客員研究員)からは「地域エネルギー事業者としての再生可能関連事業の評価」のタイトルのもと、無制限無保証の出力抑制による地域事業者経営への影響や、モンテカルロシミュレーション実施結果を中心に評価した内容を報告した。特に、融資基準となる指標(DSCR)への影響が甚大であることがわかった。

第 2 部では、「貯蔵技術としての水素の可能性」の副題のもと、九州大学 水素エネルギー国際研究センター教授 土肥英幸氏より、「再エネ大量導入における水素の役割と課題」のタイトルのもと、九州地域における太陽光発電大量導入時の対応として、出力抑制ではなく、リチウムイオン電池による貯蔵、水素製造の対応を行うことで、特に大量導入時には全体システムとしてコスト削減になるという結果が示された。

⁴⁴⁾<http://www.jst.go.jp/lcs/info/2016/08/post-50.html> 参照。

⁴⁵⁾詳細は、3.4 項「ビジョン主導型の研究開発プログラム COI との連携」(p.69) 参照。

九州大学カーボンニュートラル国際研究所招聘教授/HyGrid 研究会 広瀬雄彦氏より、「持続可能な低炭素社会に向けた水素のポテンシャル 世界は Power to Gas から Power To X へ」と題した講演では、再エネによる水素製造によって、燃料電池自動車の燃料だけでなく、化学原料としても利用可能であるとの指摘があった。提案する HyGrid(再エネを最大利用し電力グリッド・水素グリッド両方を活用するシステム)が実現した場合、特に地方においてこれまで大きな負担であった燃料費について、製造側にまわることができ、移出も行うことができるとのシミュレーション結果を紹介いただいた。

最後に、LCS 研究統括／東京大学工学系研究科教授 松橋隆治より、「九州地区における再生可能電源と水素利用事業のシステム評価」のタイトルのもと講演を行った。再生可能電源が大量導入した際の問題点として、周波数制御(LFC)、過渡安定度、電圧安定性の問題があることを指摘し、その中でも周波数制御と過渡安定度を考慮した電力系統運用モデルのシミュレーション結果を紹介した。

会場からの質問に講演者が回答する形式での議論を 30 分程度行い、再エネ水素の今後の可能性や、燃料電池自動車の普及可能性、広域運用が日本で実施可能かどうかなど、幅広い積極的な質疑が行われた。

4.3 太陽光発電に関する導入量推計と出力抑制が与える事業性評価

4.3.1 技術発展を考慮した地域別の太陽光発電導入量推計

【LCS 提案書番号：FY2014-PP-13】⁴⁶⁾

持続可能な低炭素社会の実現に向けては、再生可能エネルギーの導入拡大が必要である。我が国では、2012 年 7 月より再生可能エネルギーの固定価格買取制度が開始された。これにより再生可能エネルギーの導入が加速化されており、特に太陽光発電の導入量増加が著しくなっている。一方、この太陽光発電の大量導入等により電力系統へ与える影響が懸念され、再生可能エネルギーの系統接続容量の制限などが国や各電力会社で検討されている。LCS 提案書(FY2014-PP-13)では、現状の太陽光発電の導入量の把握及び太陽光発電の技術発展性も考慮した地域別の導入量を推計した。また、太陽電池モジュールの変換効率向上による、2030 年の導入可能性について検討した。

国の検討資料などをもとに 2030 年における太陽光発電の導入量を 140GW（住宅用及び非住宅用太陽光発電の比率を 4:6 とした）とした場合、以下の技術発展を考慮した都道府県別の発電電力量の推計を図 4-14 に示す。

- ・太陽光発電のモジュール変換効率の向上として、同じ面積に対して約 1.35 倍の太陽光パネル（約 189GW）が設置可能となる。
- ・パワーコンディショナの効率、温度係数、耐久性の向上として、約 8% の発電量の向上が期待される。

⁴⁶⁾本項目では、LCS 提案書(FY2014-PP-13)を中心に概説する。LCS 提案書番号については巻末を参照。

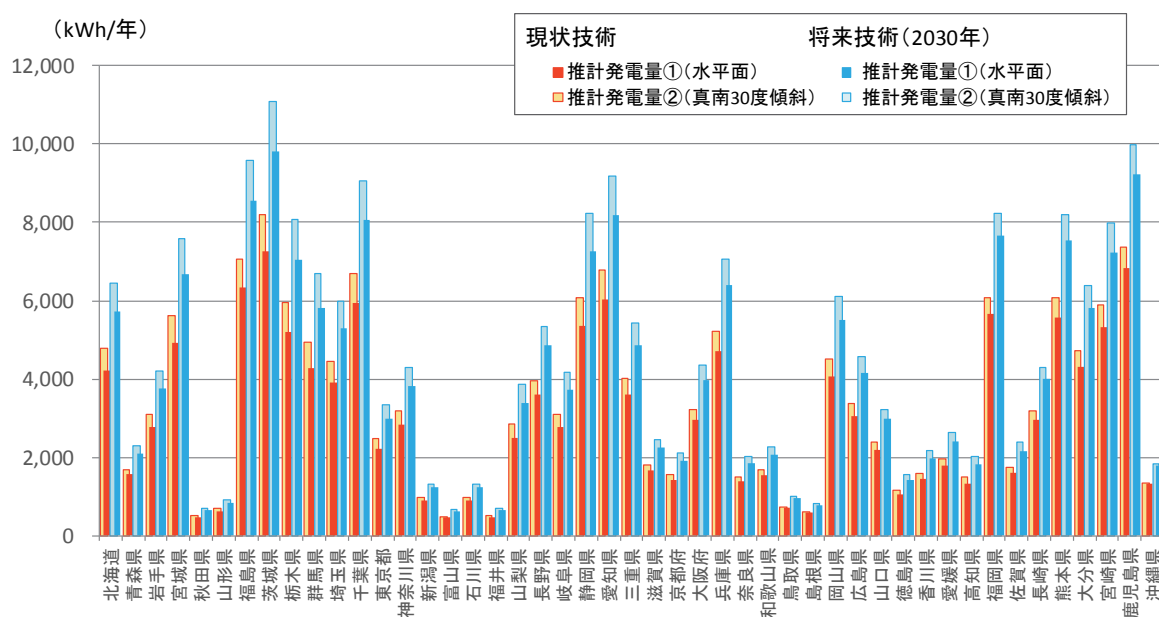


図 4-14 技術進展を考慮した 2030 年における都道府県別の推計発電電力量の振れ幅

このように太陽光発電の技術発展により、更なる導入量、発電電力量の向上のポテンシャルがあると考えられる。また、各地域の昼間最低負荷に対する太陽光発電の導入ポテンシャルを比較すると、特に東北や九州など、地域によって大きな需給のギャップがあることが示された。一方、現在政府で検討されている接続可能量の算定にあたり、電源の運用や出力抑制等のルールについては、現在の制度を前提とし、接続可能量を拡大する方策のオプションとしても、制度の運用見直し、蓄電池活用、遠隔出力制御など限定的である。

LCS では、太陽光発電の技術を詳細に検討した定量的技術シナリオを構築し、将来展望への提言をしてきた。今後は、太陽光発電の更なる導入に向けて、地域特性や社会条件を考慮した戦略的な導入シナリオの構築を図る。

4.3.2 太陽光発電における出力抑制が与える事業影響評価

【LCS 提案書番号：FY2015-PP-12】⁴⁷⁾

2012 年 7 月から開始された固定価格買取制度（FIT 制度）により、再生可能エネルギーの導入が進んでいるが、現状では、太陽光発電の導入量増加が著しく大きくなっている。この太陽光発電の大量導入等により電力系統へ与える影響が懸念され、各地で系統接続制約が生じた結果、FIT 制度が改正され、新たな出力制御のルールが設けられた。LCS 提案書(FY2015-PP-12)では、出力抑制が太陽光発電の事業性に与える影響をモンテカルロシミュレーション DCF（Discounted Cash Flow, DCF、以下、モンテカルロ DCF）法⁴⁸⁾（試行回数 10 万回）により定量的に評価し、改正され

⁴⁷⁾ 本項目では、LCS 提案書(FY2015-PP-12)を中心に概説する。LCS 提案書番号については巻末を参照。

⁴⁸⁾ 設備投資の意思決定を行う際には多くの不確実性を考慮しなければならない。ここでは、評価したい事業の不確実性要因を確率モデル化し、モンテカルロシミュレーション（試行回数 10 万回）を行った。これにより生成されたキャッシュフローを DCF 法(Discounted Cash Flow)によって将来の不確実性を考慮した事業価値を算出している。

た FIT 制度によって、事業リスクが大きくなる課題を明らかにした。対象事業に対する各試算ケースの、プロジェクト IRR（Internal Rate of Return：内部収益率）（以下、PIRR）及び債務返済能力 DSCR（Debt Service Coverage Ratio：債務返済能力、今回は融資期間 15 年の平均値を対象とした）の試算結果概要を表 4-5 に、PIRR の分布を図 4-15 に、DSCR の分布を図 4-16 に示す。

表 4-5 PIRR、DSCR 試算結果概要

統計量		ケース 1 出力制御 なし	ケース 2 出力制御あり （上限 10%）	ケース 3 出力制御あり （無制限）
試行		100,000	100,000	85,571 ⁴⁹⁾
PIRR	平均値	4.01%	2.85%	-0.06%
	中央値	4.03%	2.87%	0.89%
	標準偏差	1.28	1.31	3.9
DSCR	平均値	1.22	1.09	0.83
	中央値	1.22	1.09	0.88
	標準偏差	0.16	0.15	0.33

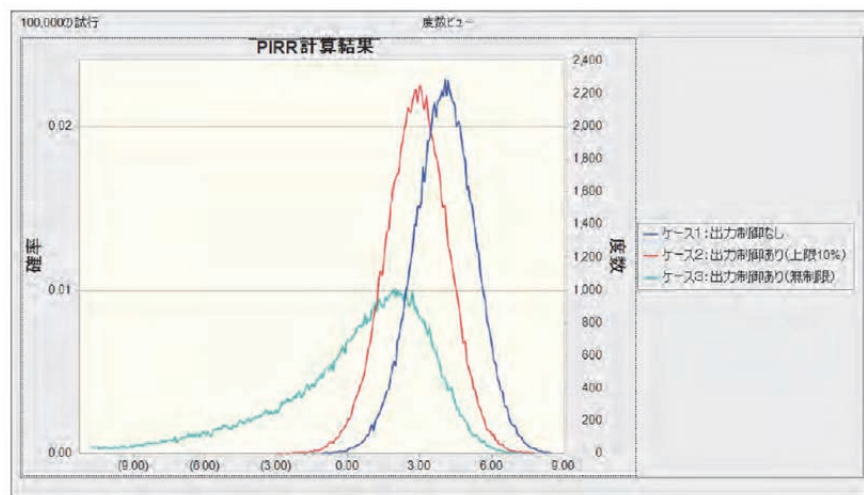


図 4-15 PIRR 分布試算結果グラフ

⁴⁹⁾出力制御率が高くキャッシュフローの大きなマイナスが続く試行回では、PIRR の算出が不能となるため、有効値が得られた試行のみを対象としている。

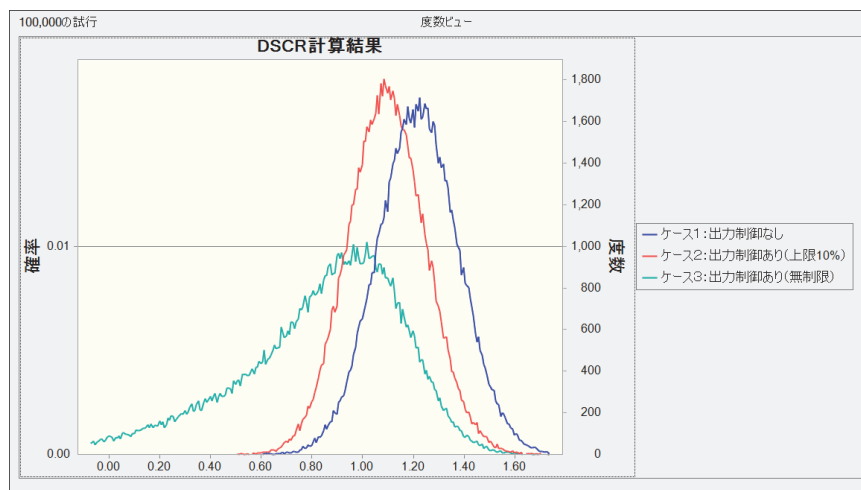


図 4-16 DSCR 分布試算結果グラフ

この結果、ケース 1、ケース 2 のように、出力制御がない、または限定的であれば、事業の下方リスクが限定され、事業の見通しもたてやすい。一方、ケース 3 では、PIRR の平均値が小さいだけではなく、標準偏差も大きく、不確実性リスクを大きく抱える事業であることがわかる。また、DSCR もケース 1、2 では平均値が 1 を超えているが、ケース 3 では、0.83 となった。DSCR が 1 を下回るということは、融資の返済が滞ることを示しており、金融機関としては事業者自己資金の割合をかなり高くしてもらいなど、融資審査において、慎重にならざるを得ない状況となることが懸念される。

今回の試算で設定したような出力制御は実際には行われなくてもいいかもしれないが、制度上、無制限・無補償の出力制御ができることになっている限り、発電事業者としては事業の下方リスクが大きく、指定電気事業者の管内で新規に事業投資を行うリスクが高いと言わざるを得ない状況である。

今後は本提案で示した課題解決に向けて、LCS においても、太陽光発電や蓄電池等の低炭素技術のコストや技術発展の評価を継続するとともに、電源計画モデル等において再生可能エネルギーの利用拡大に向けた研究を行っていく。

4.4 気候変動緩和の世界的な取り組みへの日本の貢献

【LCS 提案書番号：FY2014-PP-02】⁵⁰⁾

【LCS 提案書番号：FY2014-PP-15】⁵⁰⁾

温暖化は地球規模の問題であり、LCS では、以下 BOX1 に示した 4 つの視点から、世界経済の成長と地球温暖化の克服の両立に向けた我が国の国際戦略を検討している。

BOX1 LCS からの次期枠組みに関する提案の基本となる 4 つの視点

- 実質的に GHG 削減につながる、公平かつ実効性のある仕組み
- 民間の投資インセンティブを促進し、途上国の経済発展にある様々なビジネスチャンスを活用する仕組み
- セクター別のエネルギー効率、温室効果ガス排出原単位の改善と評価を基に、国内の次期枠組みと国際的な技術移転の枠組みの双方に展開できる戦略
- 部門や業種横断的に力を集結し、日本国の持続可能な発展と地球規模問題の改善に貢献する仕組み

LCS の国際戦略研究では、地球温暖化枠組みに関し、温室効果ガス削減に有効なスキームとして、エネルギー・環境技術の普及促進と移転による Integrated Contribution Approach（統合的貢献アプローチ、以下、ICA とする）を提案した。これは世界の大きな緩和の機会に対し、「日本の技術力の高さを更に高め、日本国内での応用とともに、世界規模で最大限に利用するもの」である。緩和の貢献度の視覚化と定量化を進めることで、先進国と途上国双方に様々なメリットと機会をもたらすものと期待できる（図 4-17 参照）。「統合」は、国内と海外での統合—それは技術開発と普及あるいは目標設定としての統合と、各種スキームの統合、例えば、制度面やファイナンスでの統合を意味する。図 4-18 と Box2 に 4 つの柱を示した。ここに示したように、統合的貢献アプローチの主旨は、技術革新、技術移転・協力、そして、世界の実質的な温暖化ガス削減を目指す、という点で、2015 年 11,12 月の UNFCCC パリ協定で確認された今後の温暖化枠組みの進む方向性と合致しており、更に、BOX2 に示した内容は、具体的に検討項目を明確にしたものである。

⁵⁰⁾本項目では、LCS 提案書(FY2014-PP-02)及び LCS 提案書(FY2014-PP-15)を中心に概説する。
LCS 提案書番号については巻末を参照。

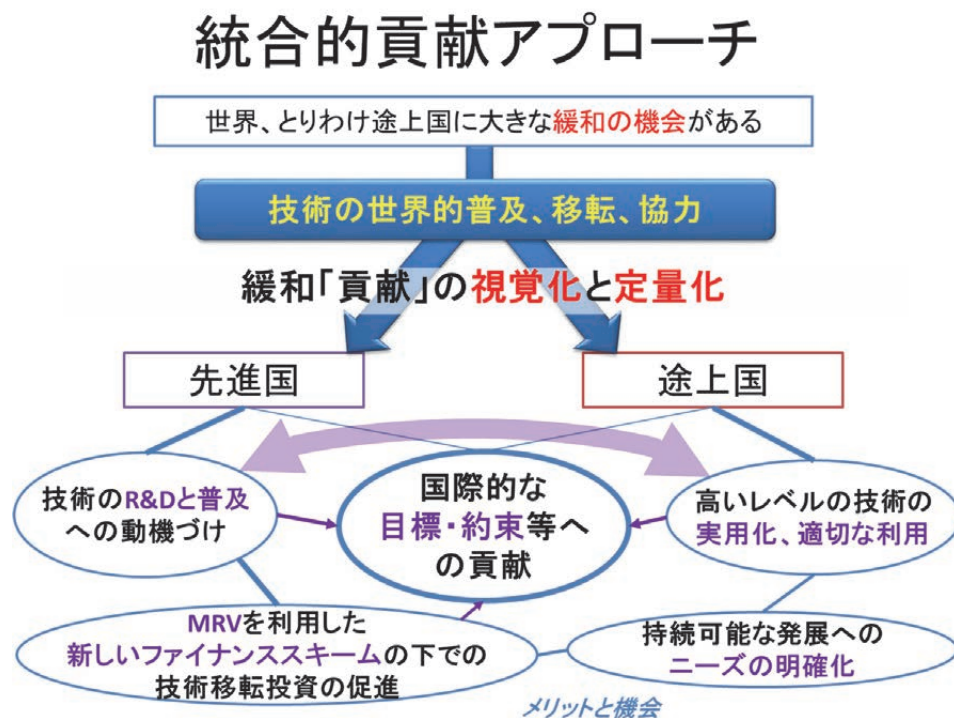


図 4-17 LCS の提案する統合的貢献アプローチ

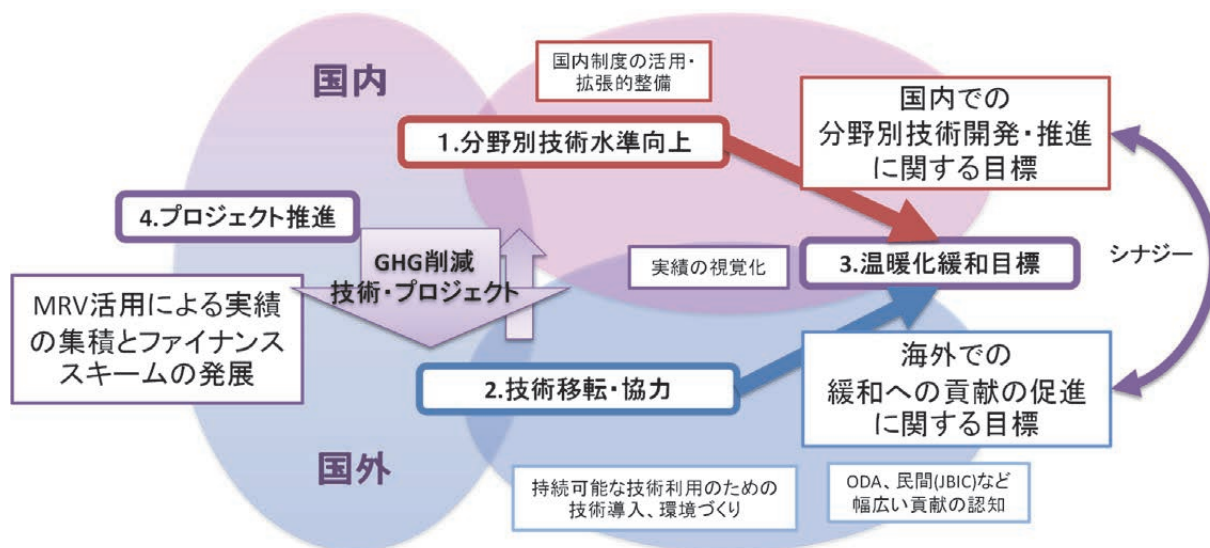


図 4-18 Integrated Contribution Approach (ICA) の 4 つの柱

BOX2 Integrated Contribution Approach (ICA) の 4 つの柱

1. 分野別・技術別の技術の目標値を削減行動目標として掲げるもの
 - エネルギー多消費産業の原単位目標や、発電効率、自動車の燃費、家電性能など分野別指標を利用
 - 国内技術開発の底上げと技術革新につながるもの
 - 高水準の省エネ・環境技術を更に発展させ、世界の技術レベル水準を向上
 - 国内の法制度施行で培った経験と築かれた制度枠組みを活用
2. 技術協力・移転を通じ、地球規模の気候変動緩和に貢献
 - 革新的で高水準の技術により、GHG 削減に期待
 - 国内では浸透し海外で普及率が低い技術の一層の利用拡大
 - 受け入れ国のニーズ、技術的可能性もふまえながら導入普及を促進し、持続可能な技術利用をめざし利用環境を整備
 - 日本にとってグローバル市場の新たな開拓が可能
3. 国内外の技術に関する努力を国レベルの温暖化目標に位置づけ
 - 国内の分野別技術水準向上を目標とする
 - 海外技術移転・協力について、JCM (Joint Crediting Mechanism) だけではなく、JICA による ODA や民間 (JBIC など) による削減貢献を定量的に把握し実績を見える形にし、目標とする
 - 短期的には、INDC (国別約束草案) へ貢献する
 - 中・長期的には、UNFCCC 枠組み如何を問わず、国の地球温暖化目標に組み込む
4. 国内外の温暖化緩和実績に関する知見を一元的に蓄積し、プロジェクト推進へ応用
 - 整理された MRV 方法論などを通じて技術移転・協力の実績を蓄積、将来プロジェクトへ情報提供
 - MRV を用いたファイナンススキームの奨励と複数スキームの統合

ここまで述べたように、低炭素社会のための将来シナリオを考える上で、ICA の概念を提案した。この考え方に沿って技術移転・技術普及の多面的な効果をみることに重要であると考えている。LCS では、以下の二つの評価を行い、技術移転・普及のメリットを定量的に検討している。

- 途上国における技術による CO₂ 削減ポテンシャルの評価
- 技術製造・普及時の経済的効果に関するバリューチェーン評価

4.4.1 途上国における技術による CO₂ 削減ポテンシャルの評価

他国への技術協力を想定した際の具体的な効果を、太陽光発電を例にとり海外における削減ポテンシャルを試算し、経済的側面からも影響を評価した。太陽光発電に限らず、技術の導入ポテンシャルの評価は世に多く存在するが、LCS では、ポテ

ンシャルを数段階に分けて定義し⁵¹⁾、地域による技術の移転・協力段階にあわせた検討課題を明確にした。

太陽光発電による導入による CO₂ 排出削減量について計算した結果を図 4-19 に示した。また、2030 年時の達成技術（寿命 30 年）を、現時点で各地に導入すると仮定したとき、初期コストを投資額、系統供給からの電気コストと年経費の差を収益として、導入後の 30 年間の内部収益率を試算した（図 4-20 参照）。

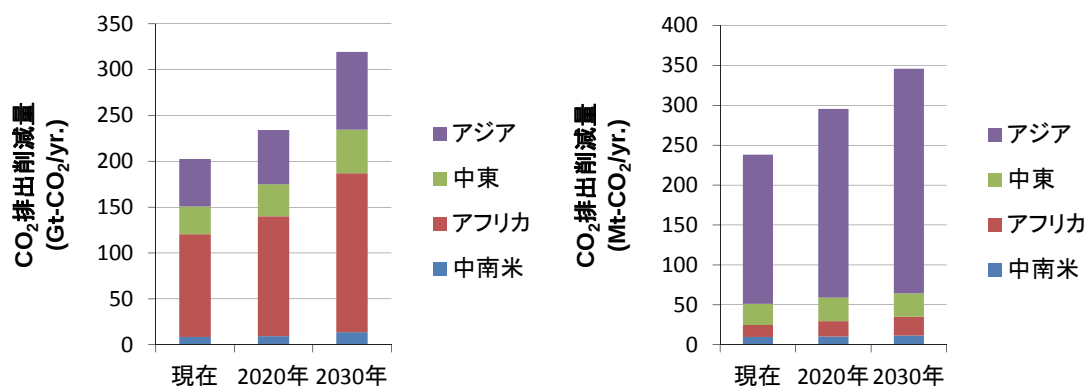


図 4-19 左：太陽光発電設備導入による CO₂ 排出削減の技術的ポテンシャル、
 右：同 CO₂ 排出削減の社会経済的ポテンシャル

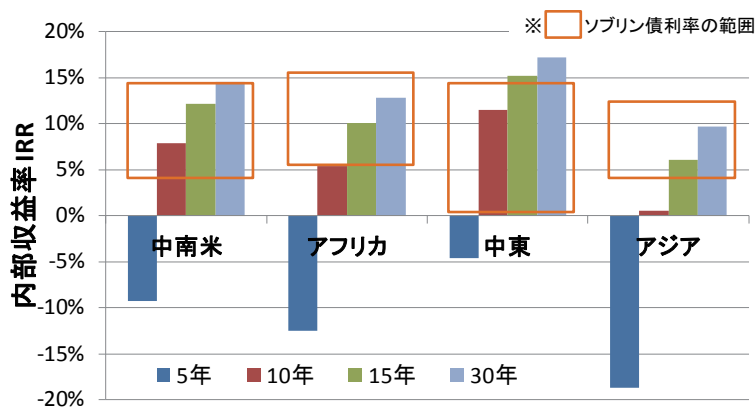


図 4-20 2030 年時 PV 導入による、その後の内部収益率

< 計算の前提 >

- LCS/JST (2014)が発表した太陽光発電セルモジュール効率を用い、現在（2013 年時点効率利用）と 2020 年、2030 年（予測値）について、各地域の太陽光発電の技術的ポテンシャルを試算。土地利用情報は、Hoogwijk（2004）が利用した土地情報を利用。

⁵¹⁾IPCC 第三次評価報告書（2001 年）第三作業部会第五章を参考に次のように定義した。物理的ポテンシャル：太陽光エネルギーの理論到達エネルギーに対し、PV が設置可能な土地のみ設置するとした場合のポテンシャル。技術的ポテンシャル：現状・将来見込まれる発電効率を考慮した場合の発電量としてのポテンシャル。社会経済的ポテンシャル：社会的制度的制約などを考慮したポテンシャル。ここでの評価では電力供給量を上限制約として算出。経済的ポテンシャル：現在の設置地域の電力料金から導入可否予測を考慮した場合のポテンシャル。

- ・系統電力の CO₂ 排出係数は電源構成によって異なるため、地域ごと、年ごとに計算したものを利用（ベースは OECD/IEA（2014）の値）。
- ・太陽光発電設備容量は Hoogwijk(2004)の用いた各地域の年間日射量（W/m²）から推定した日本と他国の年間日射量との比を用い、各地域の発電容量当たりの年間発電量（kWh/W）を想定し、設備容量を計算。
- ・系統の安定性を確保するために、日本では発電容量に対し、太陽光発電量の割合は 1 割程度とされている（経済産業省低炭素電力システム研究会、2009 年 1 月）。本 LCS 試算では、全電源設備容量に対し、1 割まで太陽光発電設備が導入可能と仮定して試算。

2030 年時技術レベルの太陽光発電による社会経済的削減ポテンシャル量は途上国全体で 350Mt-CO₂/yr であり、OECD/IEA（2014）シナリオの 2030 年の世界全体の CO₂ 排出量 36Gt-CO₂/yr のおよそ 1%、発電による CO₂ 排出量 15Gt-CO₂/yr の 2% を占める。途上国のみで見ると、発電による CO₂ 排出量 10Gt-CO₂/yr の 4% である。一方、削減の技術ポテンシャルは、2030 年全世界 CO₂ 排出量の約 9 倍であり、この大きなギャップは、制度的、技術的な障壁を撤廃する努力によって埋めていくことが期待される。経済的ポテンシャルは、例えば、収益率が 10%を超えた、中南米、アフリカ、中東の CO₂ 削減の社会経済的ポテンシャルである、とすると、64Mt-CO₂/yr となる。設備普及のために重要なポイントとして、技術開発・革新などによる発電コスト低減、エネルギー貯蔵の開発・利用、寿命まで利用する管理技術向上、低利率での貸し付けによる利用拡大が挙げられる。

4.4.2 技術製造・普及時の経済的効果に関するバリューチェーン評価

社会での技術利用が進むことで、設置場所での利用の効果のほか、材料採掘、製造、運搬、廃棄等のサプライチェーン全体にわたり、経済面・環境面の影響がある。LCS の国際戦略研究として、気候変動緩和のための国際戦略への足がかりを得ることをねらい、技術が世界で製造され利用されることによる経済効果を広く評価する。ケーススタディとして太陽光発電技術を取りあげた。図 4-21 に示すように、セル製造、モジュール製造、流通の段階について国内と海外にわけて考えると、様々な「日本」に関するフローがある。これらフローを定量的にとらえ、技術移転のバリューチェーン評価を行っている。このような流れを評価することで、技術移転・協力に関する新しい示唆が得られると考えている。

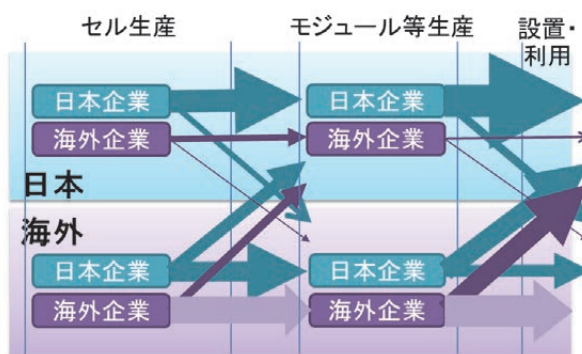


図 4-21 PV 生産から利用までの国内外の流れ

4.4.3 低炭素社会戦略センターの考える将来の国際・国内温暖化対策スキーム

世界の低炭素社会構築に向けて、将来の国際及び国内の温暖化スキームについての LCS の考えるイメージ図を図 4-22 に示した。我が国が取り組むべき内容として、以下にまとめた。

- 今後の大幅な温室効果ガス削減（2050年で80%減など）では、現在の産業構造も大きく変わる。新しいシステムにあった、新しい技術の開発は重要であり、日本の技術開発分野において、革新的取り組みと、それらを国内外で広く普及させる取り組みを両輪で行うことが重要である。
- 高水準の省エネ及び低炭素技術開発への支援環境向上や普及促進、また、諸外国への技術協力・移転促進のための法律などの整備を行う。
- 今後の、気候変動防止条約など国際的枠組みの議論において、省エネ・低炭素技術分野での貢献度が明確になるような仕組みづくりを進める。例えば、分野別の効率改善など削減行動努力の積み上げによる目標を設定し、国内外に削減成果を明示する。
- 省庁横断的な機関、大学などの協力のもと、国内の技術貢献・普及制度及び海外への省エネ・GHG削減技術移転・協力に関するデータを公平中立な方法論により集積し、分析、発信する拠点を国内に設置する。

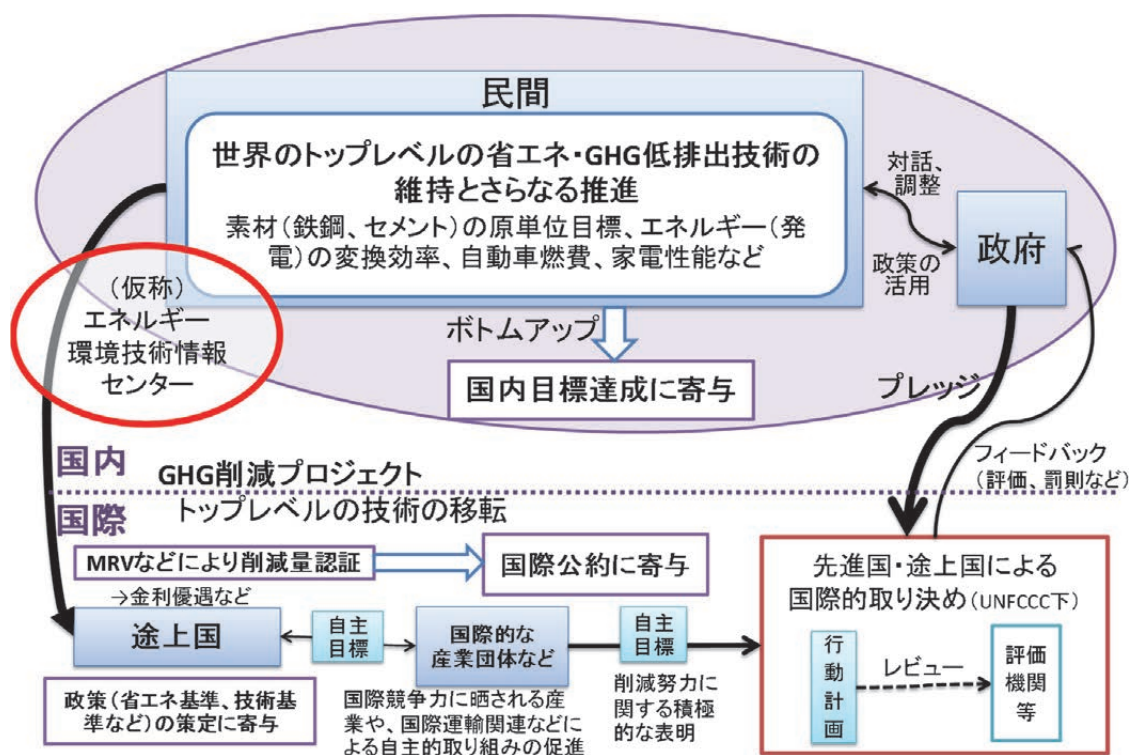


図 4-22 LCS の考える、国内・国際スキーム

これらにより期待される効果として、技術の高いレベルの維持と更なる向上は、日本をはじめ世界全体の GHG 排出削減に貢献し、国内の産業育成・発達を促し、海外展開を見据えた市場拡大により経済を活性化させることが可能になる。また、Integrated Contribution Approach により、日本の強みである技術力を活かすことにな

る。更に、省エネ法、トップランナーアプローチ等、各種省エネ・低炭素関連の既存の法規制の施行で培った経験と築かれた制度枠組みが十分活用でき、大きな障壁がなく削減行動の目標を掲げ、達成プロセスを管理することができる。そして、世界最高水準の省エネ技術を更に発展させるという目標を掲げることと、海外へ技術協力を行い定量的に示すことは、国際的にも有効な情報発信の戦略となりうるであろう。

第 5 章 今後の課題～2050 年の「明るく豊かな低炭素社会」に至る道筋

文部科学省の「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）戦略 1 として「戦略的社会シナリオ研究の実施」が記載された。その中の具体的施策として「低炭素社会実現のための社会シナリオ研究」が位置付けられた事から低炭素社会戦略センター（LCS）が発足した。「低炭素社会実現のための社会シナリオ研究」においては、我が国の経済・社会の持続的発展を伴う、科学技術を基盤とした「明るく豊かな低炭素社会」の実現に貢献するため、望ましい社会の姿を描き、その実現に至る道筋を示す社会シナリオ研究を推進し、低炭素社会実現のための社会シナリオ・戦略の提案を行っている。「明るく豊かな低炭素社会」とは何か――地球温暖化の緩和に向けた取り組みにより CO₂を中心とした温室効果ガス排出量が削減され、エネルギーが安定的に確保され、安全・安心な生活が維持でき、そして、経済が拡大して生活の豊かさが増し、若者に将来への展望が開け、高齢者が生きがいを持って暮らすことができる活力ある社会と定義している。

平成 28 年 5 月に閣議決定された地球温暖化対策計画の中で、温室効果ガス排出削減の目標として 2030 年 26%と設定されている。また、2050 年には温室効果ガス排出 80%削減を目指す事が明記されている。これらの目標の達成を目指して、バックキャスティング及びフォーキャスティングを併用しながら社会シナリオを描く事が LCS のミッションである。2050 年 80%減目標にはエネルギーシステムの抜本的な変更が必要であり、その世界はフォーキャスティングでは描くことができない。まず 2050 年の社会像を示して、「それまでに何をしなければいけないのか」を描き出す事（＝バックキャスティング）が求められる。2030 年に関しては、フォーキャスティングとバックキャスティングの境目であり、両面から 2030 年のシナリオを描く手法を取っている。そこに向けて、技術をまず大前提に置きながら、経済・社会システムの制度設計も含めて、研究開発課題を明確化し、シナリオを描いている。

LCS は、大きく、技術の評価をしている定量的技術システム研究グループ及び経済制度を検討して社会システムを設計する定量的経済・社会システム研究グループから構成され、融合した形で低炭素社会システムを構築し、科学的研究に基づいた提案を行っている。また、地方・国の行政機関とも連携し、提案された成果を社会実装に導く事業を推進している。

まず、定量的技術システムにおいては、製造プロセスをデータベース化し、階層構造のデータモデルを作成している。それに基づいて、技術のコストを技術ごとに評価をしている。例えば、太陽光発電の場合、多結晶、単結晶、量子ドット型などそれぞれの技術を対象にしている。架台の設計や、架台の材料選択などの非常にマクロなスケールから、ミクロ、ナノに至る結晶構造制御まで検討し、その開発・製造プロセスを階層構造としてとらえ、データを積み上げている。次の段階で、それらをデータベースにした後、最終的には効率、性能がどの程度なのか、コストが幾らになるのかという事を計算する。

先端的な研究開発が取り組まれている技術が 2020 年から 2030 年頃の実現し、2050 年に社会の中に広く普及していることを前提としている。理想とする低炭素社会から、バックキャスティングにより、今後取り組むべき課題を選定するために、このような低炭素技術を個別に対象とした定量的技術システム研究が有効である。

一方、低炭素技術は、現実には必ずしも世の中に普及していない。なぜ普及しないかを解明するのが定量的経済・社会システム研究の役割である。LCS では消費者の行動の限定合理性について検討している。「低炭素技術は元が取れる投資であっ

でも必ずしも購入されるものではない」ことが行動経済学で知られているが、その問題を克服する方法論として「電気代そのまま払い」という仕組みを提案している。これは、「節約されるエネルギーコストで省エネ技術の導入費用を賄うことで、大きな初期費用負担なく家庭が導入できる仕組み」である。現在、事業スキームを具現化しており、その事業体をグリーンパワーモデレータと呼ぶ。省エネの推進だけではなく、再生可能エネルギーの導入に従って必要となる系統の変動電源への対応として、系統の安定化に貢献できるような事業体を目指したものになるよう提案している。また、家庭の電力使用量見える化実験では、LCS は「i-cosmos」というインターネットを利用した各戸の電気消費量の可視化システムを開発した。関東を中心に数百世帯の家庭について、1 分ごとの電力消費量のデータを継続的に取得している。得られたデータを利用することで、省エネの促進のためのシステム構築、新たな電力ネットワーク（アンシラリーサービス導入など）を通じた系統安定化の家庭からの貢献方法などを検討することも今後重要である。このような制度設計を通じて、「明るく豊かな低炭素社会」を目指すシナリオを作成していく。

将来の温暖化ガス排出を 2050 年 80%削減としたときの社会では、現在とはエネルギーシステムに抜本的变化があり産業構造や技術が変わるであろうと想定され、それがイノベーションにつながっていく。社会の低炭素化と経済活性化の両立を目指したシナリオ提案に向けて、社会につなげる技術の定量的な評価、社会に技術が浸透したときの経済・社会の姿を描く LCS 独自の方法論が重要である。将来の「明るく豊かな低炭素社会」に向けて、複数の選択肢（道筋）を示す。今後は、定量的技術システム研究による成果と定量的経済・社会システム研究による成果を統合し、シナリオを関連付け、精緻な社会システムを描き提案する必要がある。これは、日本としての目標、更に国際貢献を進め、日本が技術のハード、ソフト分野でリーダーシップを取り続けるために肝要な取り組みと考えている。

特に今後取り組むべき研究・調査の主な課題として、再生可能エネルギーが主流となる将来の電力システムの検討が挙げられる。安定的な運転のために、どう変動を吸収し、過渡安定度の問題をクリアするのが鍵である。また、省エネルギーの推進、電源地域の選定、地域に応じた再生可能エネルギーの発電量、電源構成の割合、電源地域から電力消費地までの距離と送電容量、更に、日本の人口の推移や超高齢社会の進展等、多様な因子を踏まえた定量的な検討を行う必要がある。このような緻密・かつ包括的な検討を重ねることで、日本が強みを持つ革新的技術分野でどのように日本特有の問題に対応しながら、広く技術を普及させ、効果をあげられるのか（定量的経済・社会システム）、科学技術の開発課題は何か（定量的技術システム）、社会がどう変わっていくのかを示し（低炭素社会システム構築）、研究課題を明らかにする。そして、技術と経済・社会は、これからも変動するであろう。それに先立つシナリオを作成し、提案していくことが今後の使命になる。

COP21 でのパリ協定の採択、及び 2016 年 11 月の発効等を踏まえて、2050 年を見据えた低炭素社会の実現に向け、これまでの取り組みを継続的に進展させるとともに、JST 関係事業、関係府省、地方自治体、企業等との連携による社会実装活動を更に進展させ、社会実装により抽出された課題のフィードバックにより、社会シナリオ・戦略の深化をより一層進める。研究推進においては「技術評価と社会実装の現場の間のフィードバック」と、「個人の消費行動や市場等の変化」のダイナミックなループ（図 5-1 参照）を止めずに、不断に最新のデータを取り込んで「最新の課題」を明確にすることに留意する。

我々は、人文・社会科学と自然科学の研究者が参画する実施体制という LCS の特

徴を活かし、JST 内外の制度や他機関との連携により、総力を挙げて、これからの低炭素社会の実現に貢献したいと考えている。

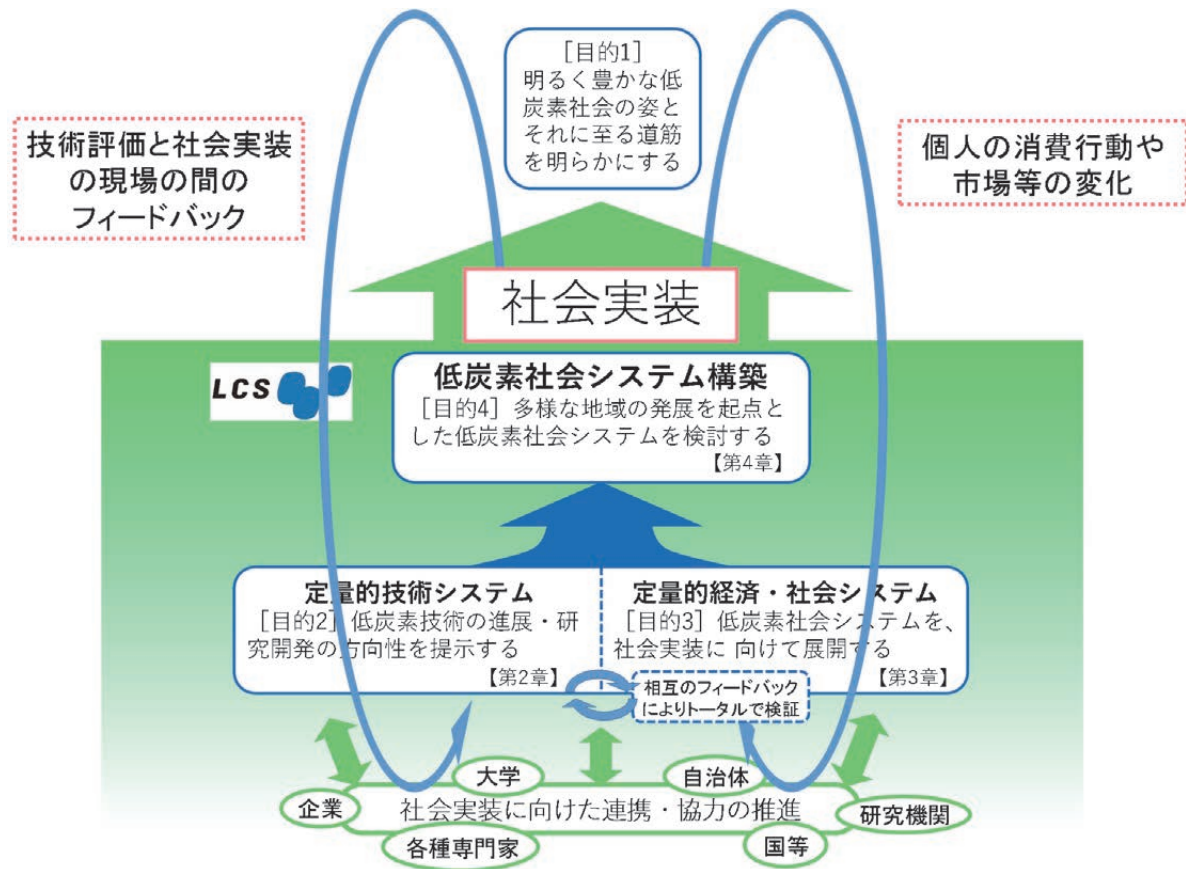


図 5-1 技術普及と社会変化のダイナミックな時間的プロセスの概念図 (図 1-3 再掲)

低炭素社会の実現に向けた技術および経済・社会の定量的シナリオに基づく イノベーション政策立案のための提案書⁵²⁾

[平成24年7月公表]

「低炭素社会づくりのための総合戦略とシナリオ」(社会シナリオ第1版)

[平成26年6月公表] LCS-FY2014-PP-00

平成25年度総合編「明るく豊かな低炭素社会」の実現を目指して
(社会シナリオ第2版)

平成25年度

LCS-FY2013-PP-01

「気候変動緩和技術の海外移転の促進」平成25年11月 (田中加奈子)⁵³⁾

LCS-FY2013-PP-02

「太陽光発電システムー要素技術の構造化に基づく定量的技術シナリオと科学・
技術ロードマップー」平成26年3月 (井上智弘)

LCS-FY2013-PP-03

「蓄電池システムー要素技術の構造化に基づく定量的技術シナリオと科学・技術
ロードマップー」平成26年3月 (三森輝夫、岩崎博)

LCS-FY2013-PP-04

「固体酸化物形燃料電池システムー要素技術の構造化に基づく定量的技術シナリ
オと科学・技術ロードマップー」平成26年3月 (大友順一郎)

LCS-FY2013-PP-05

「バイオマス廃棄物のメタン発酵(着手段階)」平成26年3月
(三森輝夫、岩崎博)

LCS-FY2013-PP-06

「中小水力発電ー要素技術の構造化に基づく定量的技術シナリオと科学・技術ロ
ードマップ(着手段階)ー」平成26年3月 (浅田龍造)

LCS-FY2013-PP-07

「『低炭素技術設計・評価プラットフォーム』の構築」平成26年3月(加藤大輔)

LCS-FY2013-PP-08

「家庭の省エネ促進と省エネ価値市場の創成のための政策パッケージデザインへ
『電気代そのまま払い』の実現とグリーンパワーモデレータ(GPM)の創出」
平成26年2月 (高瀬香絵)

LCS-FY2013-PP-09

「民生家庭部門の省エネルギー促進からの低炭素社会実現」平成26年3月
(磐田朋子)

平成26年度

LCS-FY2014-PP-01

「東日本大震災後における消費電力の変化」平成26年4月 (加藤大輔)

⁵²⁾ <http://www.jst.go.jp/lcs/documents/publishes/index.html> に、各 LCS 提案書の pdf ファイルを掲
載。

⁵³⁾ () 内は、当該 LCS 提案書の提案者を示す。以下、同様。

LCS-FY2014-PP-02

「温暖化対策における技術に着目したIntegrated Contribution Approach（総合的貢献アプローチ）と他国への技術協力の在り方への提言」平成26年4月
（田中加奈子）【第4章4.4】⁵⁴⁾

LCS-FY2014-PP-03

「太陽光発電システム（Vol.2）一定量の技術シナリオを活用した高効率シリコン系太陽電池の経済性評価」平成27年3月（井上智弘）【第2章2.2.1】

LCS-FY2014-PP-04

「蓄電池システム（Vol.2）高容量化活物質を用いた蓄電池のコスト試算と将来展望」平成27年3月（陳怡静）【第2章2.2.4】

LCS-FY2014-PP-05

「固体酸化物形燃料電池システム（Vol.2）中・大型機SOFC製造コスト評価と技術開発課題」平成27年3月（大友順一郎）

LCS-FY2014-PP-06

「中小水力発電（Vol.2）開発可能な発電量電力量と発電原価、設備利用率との関係」平成27年3月（浅田龍造）【第2章2.3.1】

LCS-FY2014-PP-07

「地熱発電（Vol.1）発電量拡大に向けた設計・評価」平成27年3月
（石川環）

LCS-FY2014-PP-08

「バイオマス廃棄物のメタン発酵（Vol.2）プロセスの合理化をめざして」平成27年3月（三森輝夫、岩崎博、加藤大輔）

LCS-FY2014-PP-09

「林業の活性化を通じた地域における低炭素社会の実現ー木材チップ等の製造コスト検討ー」平成27年3月（大友順一郎、海邊健二）【第2章2.3.3】

LCS-FY2014-PP-10

『低炭素技術設計・評価プラットフォーム』の構築（Vol.2）平成27年3月
（加藤大輔、西川浩、岩崎博、三森輝夫）【第2章2.1.3】

LCS-FY2014-PP-11

「プロセス機器選定と製造コスト、環境負荷算出のための基礎データベース作成ー製造機器・材料・コスト情報の構造化ー」平成27年3月
（岩崎博、三森輝夫）【第2章2.1.3】

LCS-FY2014-PP-12

「低炭素社会実現に向けたデータ活用型材料研究」平成27年3月（門平卓也）

LCS-FY2014-PP-13

「技術発展を考慮した地域別の太陽光発電導入量推計」平成27年3月
（吉岡剛）【第4章4.3.1】

LCS-FY2014-PP-14

「現行技術による低炭素化のポテンシャルと経済影響評価試算」平成27年3月
（高瀬香絵）【第4章4.1.2】

⁵⁴⁾ 【】内は、本文書での引用箇所を示す。以下、同様。

LCS-FY2014-PP-15

「温暖化対策のためのIntegrated Contribution Approach（統合的貢献アプローチ）
の中で検討した途上国における太陽光発電システム利用の発電及びCO₂排出削
減ポテンシャル評価」平成27年3月（田中加奈子）【第4章4.4】

平成27年度

LCS-FY2015-PP-01

「太陽光発電システム（Vol.3）一定量の技術シナリオに基づくコスト低減技術
評価（タンデム型を含む高効率化合物系太陽電池）－」平成28年3月
（井上智弘）【第2章2.2.1】

LCS-FY2015-PP-02

「蓄電池システム（Vol.3）－リチウム空気電池のコスト評価と技術開発課題
－」平成28年3月（陳怡靜）【第2章2.2.4】

LCS-FY2015-PP-03

「固体酸化燃料電池システム（Vol.3）－将来の電源構成におけるSOFCの役
割と技術開発課題－」平成28年3月（大友順一郎）【第2章2.2.2】

LCS-FY2015-PP-04

「固体高分子形燃料電池用非白金触媒の特徴と課題」平成28年3月
（脇慶子）【第2章2.2.3】

LCS-FY2015-PP-05

「地熱発電（Vol.2）－高温岩体発電の発電コスト試算－」平成28年3月
（石川環）【第2章2.3.2】

LCS-FY2015-PP-06

「木質バイオマス燃料のコスト低減－林業素材生産コストの機械化推進による低
減効果－」平成28年3月（浅田龍造）【第2章2.3.3】

LCS-FY2015-PP-07

「バイオマス廃棄物のメタン発酵（Vol.3）－反応解析によるプロセス合理化の
検討－」平成28年3月（加藤大輔、三森輝夫、岩崎博）【第2章2.3.4】

LCS-FY2015-PP-08

「CCS（二酸化炭素回収貯留）の概要と展望－CO₂分離回収技術の評価と課題
－」平成28年3月（岩崎博、三森輝夫）【第2章2.4.1】

LCS-FY2015-PP-09

「低炭素社会実現に向けたデータ活用型材料研究（Vol.2）」平成28年3月
（門平卓也）【第2章2.5】

LCS-FY2015-PP-10

「燃料電池設置型一括受電集合住宅において電力融通を行う際の経済性の評価」
平成28年3月（前田和希、松橋隆治）【第4章4.2.4】

LCS-FY2015-PP-11

「民生家庭部門の省エネルギー促進からの低炭素社会実現（Vol.2）」
平成28年3月（磐田朋子、田中加奈子）【第3章3.2】

LCS-FY2015-PP-12

「太陽光発電における出力抑制が与える事業影響評価」平成28年3月
（吉岡剛）【第4章4.3.2】

LCS-FY2015-PP-13

「省エネルギー型空調の実現に向けた脳活動計測による温熱感覚の評価」
平成28年3月 (井原智彦、吉田好邦)

LCS-FY2015-PP-14

「持続可能な社会に向けた施策の有効性判断に資する指標評価の構築」
平成28年3月 (坂本智幸)

LCS-FY2015-PP-15

「民生部門の省エネへ向けた『電気代そのまま払い』－実証実験の経過と日本・世界の動向－」平成28年3月 (高瀬香絵)【第3章3.3】

LCS-FY2015-PP-16

「エネルギー需要見通しから見る低炭素社会に向けた課題と展望」平成28年3月
(坂本智幸)【第4章4.1.1】

LCS-FY2015-PP-17

「再生可能エネルギー大量連系時における需給制御システムの提案」
平成28年3月 (高山真一、松橋隆治)【第4章4.2.1】

LCS-FY2015-PP-18

「九州地域における太陽光発電大量導入と過渡安定度を考慮した電力システムの新しい経済的負荷配分制御の研究」平成28年3月
(櫻木政徳、松橋隆治)【第4章4.2.3】

LCS-FY2015-PP-19

「既存電源および電気自動車の活用を考慮した周波数調整市場の設計とその経済性評価」平成28年3月 (山本有途、松橋隆治)【第4章4.2.2】

本文書に関するお問い合わせ先：

低炭素社会戦略センターの取り組みについて 国立研究開発法人科学技術振興機構
低炭素社会戦略センター企画運営室
<http://www.jst.go.jp/lcs/inquiry/>

低炭素社会の実現に向けた
技術および経済・社会の定量的シナリオに基づく
イノベーション政策立案のための提案書

平成 28 年度 総合編

2050年の「明るく豊かな低炭素社会」
実現のための課題と展望

平成 28 年 12 月

**“Challenges and Perspectives toward the Realization of
Dynamic and Affluent Low Carbon Society in 2050”,**
Summary Report 2016,
Proposal Paper for Policy Making and Governmental Action
toward Low Carbon Societies,
Center for Low Carbon Society Strategy,
Japan Science and Technology Agency,
2016.12

国立研究開発法人科学技術振興機構 低炭素社会戦略センター

本提案書に関するお問い合わせ先

国立研究開発法人科学技術振興機構 低炭素社会戦略センター 企画運営室
〒102-8666 東京都千代田区四番町 5-3 サイエンスプラザ 4 階
TEL : 03-6272-9270 FAX : 03-6272-9273 E-mail : lcs@jst.go.jp
<http://www.jst.go.jp/lcs/>

© 2016 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。
