

脱炭素手段としての電化

Electrification for Decarbonization

戸田直樹*

1. はじめに

2015年に採択されたパリ協定を受けて、主要国は野心的な温室効果ガス排出削減目標を打ち出している。日本政府も2019年6月に「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」を閣議決定し、公表したところであり、その中で今世紀後半のできるだ

け早期に「脱炭素社会」を実現していくことを目指すとしている。現在の取り組みの延長線では困難な目標であり、非連続なイノベーションを通じて環境と成長の好循環を実現することが必要となる。

パリ協定を受け、主要国が国連の気候変動枠組条約事務局に提出した長期戦略等の比較を表1に示す。各国とも日本と同様に野心的な温室効果ガス排

表1 主要国の長期戦略の比較⁽¹⁾

		米国	カナダ	英国	フランス	ドイツ	
コンセプト (柔軟性の確保)		削減目標に向けた野心的ビジョン (足下での政策立案を意図するものではない)	議論のための情報提供 (政策の青写真ではない)	経路検討による今後数年の打ち手の参考 (長期予測は困難)	目標達成に向けたあり得る経路 (行動計画ではない)	排出削減に向けた方向性を提示 (マスタープランを模索するものではない)	
目標・政策方向性	削減目標	▲80%以上 (2005年比)	▲80% (2005年比)	▲80%以上 (1990年比)	▲75% (1990年比)	▲80~95% (1990年比)	
	ゼロエミ	変動再エネ	●インフラ・規制両面で支援必要 (再エネ全体で55~65%)	●風力・太陽光、水力も更に拡大必要 (再エネ全体で50~80%等)	●洋上風力など新規市場参入を支援	●再エネ統合のために更なる柔軟性が必要	●変動再エネをセクターカップリングで最適化 (再エネ全体で80%)
		安定再エネ・原子力	●運転延長&次世代原子力投資が必要 (17~26%)	●今後15年で原子力に250億ドル投資予定 (5~50%)	●次世代原子力の開発等に向けたイノベーションを支援	●原子力比率50%へ(エネルギー転換法)	
		火力(CCS・水素)	●幅を持った想定(CCS: 0~25%)	●CCS付含めて想定(CCS: 0~10%)	●2025年までにCCSが無い石炭火力廃止	●極端なゼロエミ化シナリオではCCSが不可欠	●石炭火力新設を支援しない
	熱・輸送の電化・水素化CCUS活用	●電化が進展(45~65%) ●水素は電化困難な分野で重要な役割を担う可能性	●各分野での電化は排出削減に不可欠(40~72%) ●多排出産業CCS基地 ●重工業・船舶で水素活用の可能性あり	●ヒートポンプ・EVの普及推進 ●CCUS技術を先導 ●水素はFCV、産業と民生の熱供給に利用	●省エネ促進に向けて電化が重要 ●多排出産業でCCS活用	●自動車・民生熱利用の電化(30%程度) ●水素・CCUSは重工業分野での脱炭素化に貢献	
	省エネ	●エネルギーシステム全体で効率向上必要(▲24~30% 2005年比)	●エネルギーシステム全体で効率向上必要(▲5~35% 2014年比)	●全ての家庭の省エネ性能を一定水準まで引き上げ必要	●各分野における大幅な省エネ必要(▲50% 1990年比)	●経済成長とエネ消費の強いデカップリングが必要(▲50% 2008年比)	
	海外貢献	●米国製品の市場拡大を通じた貢献	●国際貢献を視野(0~15%)	●環境投資で世界を先導	●仏企業の国際開発支援を通して貢献	●途上国投資機運の維持・強化	
実行のメカニズム		定期的レビュー	定期的レビュー	カーボンバジェット	カーボンバジェット	科学的な検証・公共との対話	

※定量値は長期戦略中のシナリオの幅や各国個別目標値等。

出所：総合資源エネルギー調査会 基本政策分科会（第27回会合）（平成30年5月16日（水））資料1

*東京電力ホールディングス株式会社

出削減目標を打ち出しているが、電化の推進を温室効果ガス排出削減のための重要な政策として掲げている。日本の長期戦略は、非連続なイノベーションとして水素やカーボンリサイクルにより焦点が当たっているように思えるが、再エネの主力電源化とセットで実用段階にある電化技術の普及を図っていくことは、今すぐにはできること、あるいはやるべきことである。

2. 「電源の低炭素化×需要の電化」のポテンシャル

実際、「電力供給サイドで電源の低炭素化を進めること」と「需要サイドで電化技術への置換を進めること」の掛け算は、現時点で実用段階にある技術だけを想定しても、二酸化炭素(CO₂)排出量を大幅に削減するポテンシャルがある。東京電力ホールディングス経営技術戦略研究所で行った簡単な試算を紹介する。

図1が日本の最終エネルギー消費である。左端は2013年度の実績で12.0エクサ(10の18乗)ジュール(以下EJ)である。この数字は日本エネルギー経済研究所のエネルギー・経済統計要覧に基づくが、

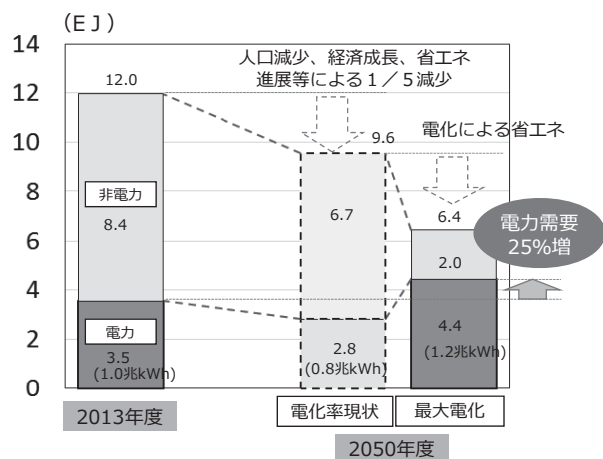


図1 最終エネルギー消費と電力消費
※電力消費には自家発電を含む。

石油化学の原料であるナフサ・LPGは除外している。エネルギー起源のCO₂にこれらが含まれていないからである。他方、高炉で用いる原料炭は含んでいる。2013年時点の電化率は30%弱である。2050年度の最終エネルギー消費は、現在から電化率が変わらず、人口一人当たりの最終エネルギー消費が一定であると仮定すると9.6EJになる(中央)。人口推計は、国立社会保障・人口問題研究所による日本の将来推計人口(平成29年推計)から、死亡中位仮定・出生中位仮定の推計を用いた(2013年127,298 → 2050年101,923(千人))。2050年度断面で人口は2割減少するので、最終エネルギー消費も2割減少と想定する。人口一人当たりの最終エネルギー消費は、省エネルギーが進展すれば下振れするし、経済成長があれば上振れする等、不確定要素があるが、2050年という長期の時間断面でそれぞれの影響を定量的に評価することは難しいので、上振れ要因も下振れ要因も均衡していると仮定している。大きな世界観を論じるにはこれで十分意味はあると考える。

ここから、現時点で実用段階にある電化技術が全面的に採用されたと仮定する。すなわち、家庭用・業務用(民生部門)の熱需要はヒートポンプやIHで化石燃料の代替が可能なのですべて電化されたとした(電化率 53%(2013年度)→100%(2050年度))。運輸部門は、自動車はすべて電気自動車に置き換わることを想定し、船舶・航空機は従来通り化石燃料を使用するとして(電化率 2%(2013年度)→72%(2050年度))。産業部門はざっくりと100℃未満の熱需要、蒸気需要はIHやヒートポンプで代替可能と想定し、その他は引き続き化石燃料を活用すると想定した(電化率 31%(2013年度)→51%(2050年度))。以上の前提条件の詳細を表2に示す。またその前提から導かれる最終エネルギー消費の試算結果は図1の右端の棒グラフである。電気機器は需要端の効率が高いため、中央と比べ最終エネル

表2 部門別の電化率等

部門	現状の電化率 (2013年度)	電化ポテンシャル	代替電気機器
家庭	49%	100%	・ 暖房、給湯用途→ヒートポンプ ・ 厨房用途→IH
業務	59%	100%	・ 冷暖房、給湯用途→ヒートポンプ ・ 厨房用途→IH
運輸	2%	航空・海運以外100% (部門計で72%)	・ ガソリン車→EV
産業	31%	直接加熱用途以外100% (部門計で51%)	・ 工場空調・加温・100℃未満の乾燥ボイラー→ヒートポンプ ・ 上記以外の蒸気用途→IH

ギー消費全体は大きく減少するが、電力需要は25%ほど増加する結果となる。

図1に並べた3つのケースに対応したCO₂排出量を図2に示す。2050年度の電源構成は表3に示す。2014年の環境省による『平成26年度2050年再生可能エネルギー等分散型エネルギー普及可能性検証検討委託業務報告書』の高位ケースを、実現性を特に問うことはせず、発電電力量7,339億kWhがそ

のまま実現すると想定した。この場合、全発電電力量に占める再生可能エネルギーの割合は55%であり、太陽光発電、風力発電といった自然変動電源の割合は34%となる。再生可能エネルギーで賄う55%の残りの45%は、在来型の電源で賄うことになるが、原子力10%、ガスコンバインドサイクル火力35%と仮定した（この内訳に特に根拠はない）。

このようにいわゆるCO₂フリーの電源が全体の65%を占める電源構成であっても、電化率が現状から横ばいであると、CO₂排出量は現状の半減にとどまる（図2中央）。しかし、同時に需要の電化が進めると、72%削減するポテンシャルがあることがわかる（図2右端）。

3. 電化の進展は理論的帰結

世界の主要な16の温室効果ガス排出国で構成する国際コンソーシアムDeep Decarbonization Pathways Project (DDPP) は、温室効果ガス削減のための方策には次の3つの柱があるとする⁽²⁾。

- 第一の柱 省エネルギー
- 第二の柱 電気または燃料の脱炭素化
- 第三の柱 より低炭素なエネルギー最終的には脱炭素エネルギーへのシフト

電化推進の取り組みは、第二の柱と第三の柱に該当する。DDPPに所属する国の研究機関がDDPPに提出している温室効果ガス大幅削減のシナリオを図3に整理した。いずれの国も2050年に向けて大幅な電化率の上昇を見込んでいる。

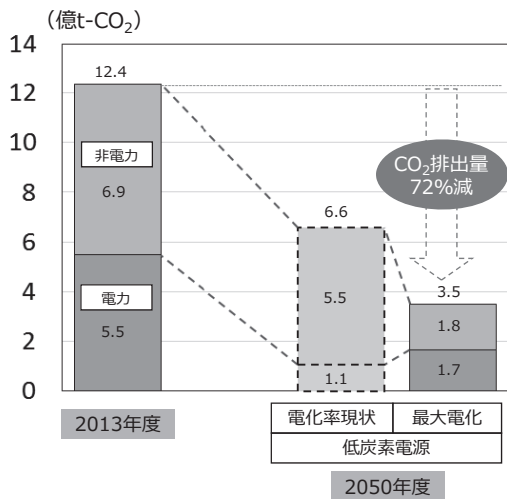
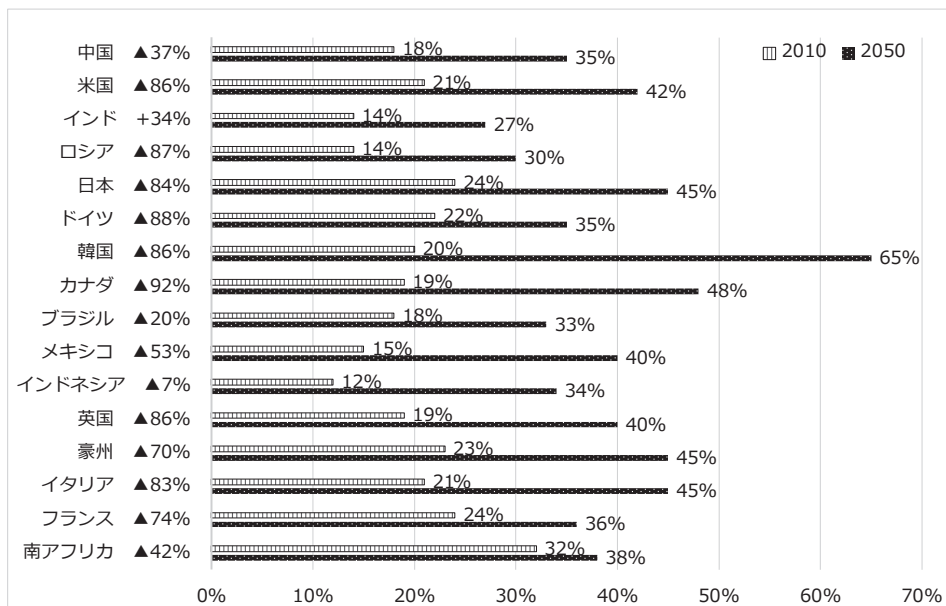


図2 CO₂排出量（エネルギー起源）
※低炭素電源の発電量構成：再エネ+原子力（65%）、火力（35%、熱効率（代表値）50%）

表3 図2における低炭素電源の電源構成

再エネ	原子力	火力
55% (うち太陽光+風力で34%)	10%	35%



出所：DDPPの各国ファクトシート・報告より作成

図3 DDPP加盟国の脱炭素シナリオにおける電化率

これは、太陽光発電、風力発電等の再生可能エネルギーの発電コストが全世界的に低下し、従来の電源に対して競争力を持ってきていることによる。図4に主な再生可能エネルギー電源の均等化発電原価(LCOE：Levelized Cost Of Electricity)の推移を示す。折線グラフが世界全体のプロジェクトの加重平均を示している。アミのかかっている部分が、火力発電費のレンジを示しており、陸上風力、太陽光発電、太陽熱発電は大部分の火力発電に対して既に競争力を持っていることが分かる。洋上風力も●でプロットしたプロジェクトによっては、高い競争力を持っている。ただし、これは全世界の平均であり、日本の再生可能エネルギーは国際的にはまだ割高な水準にあるので、さらなるコスト低減に努める必要がある。

現在、日本のエネルギー産業はいくつかの不可避かつ非可逆的なトレンドに直面している。筆者は2017年に刊行した拙著⁽⁴⁾の中で、これらを「5つのD」と呼んだ。すなわち、Decentralization(分散化)、Decarbonization(脱炭素化)、Deregulation(自由化)、Digitalization(デジタル化)、Depopulation(人口減少)である。電化の推進は、これら5つのDのもたらす理論的な帰結としての側面もある。推進というよりも、結果として進展するというべきなのかもしれない。そのメカニズムを図5に示すが、トリガーとしては、再生可能エネルギーの急速なコスト低減がある(分散化)。

図5では指数関数的価格破壊と表現しているが、世界的にはそのように呼んで差し支えない状況が起きている。それは、各種エネルギーの中で電気の競争優位が高まることを意味する。そして、脱炭素化のトレンドによりCO₂排出の制約が高まれば、CO₂フリーの再エネの比率が増えている電気の競争優位はさらに強まることとなり、電化が進展する。電化が進展すると、当然に電力需要は増加するが、増分需要はデジタル化の恩恵で柔軟に電力使用を制御できるもののウェイトが高まるから、自然変動性の再生可能エネルギーの導入可能量を増加させる。すると、急速に低廉化したCO₂フリーの電気のシェアが高まり、電気の競争優位がさらに強化される、といった正のスパイラルが理論上は働かずである。

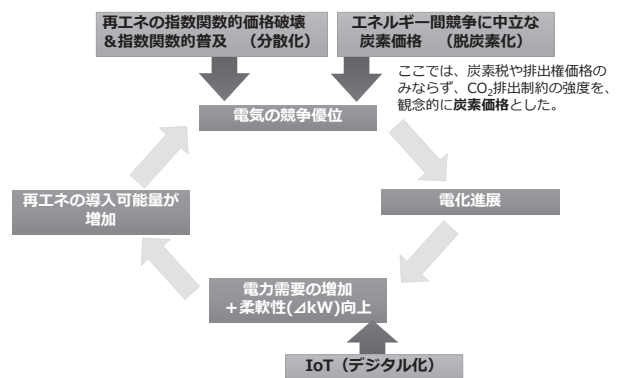
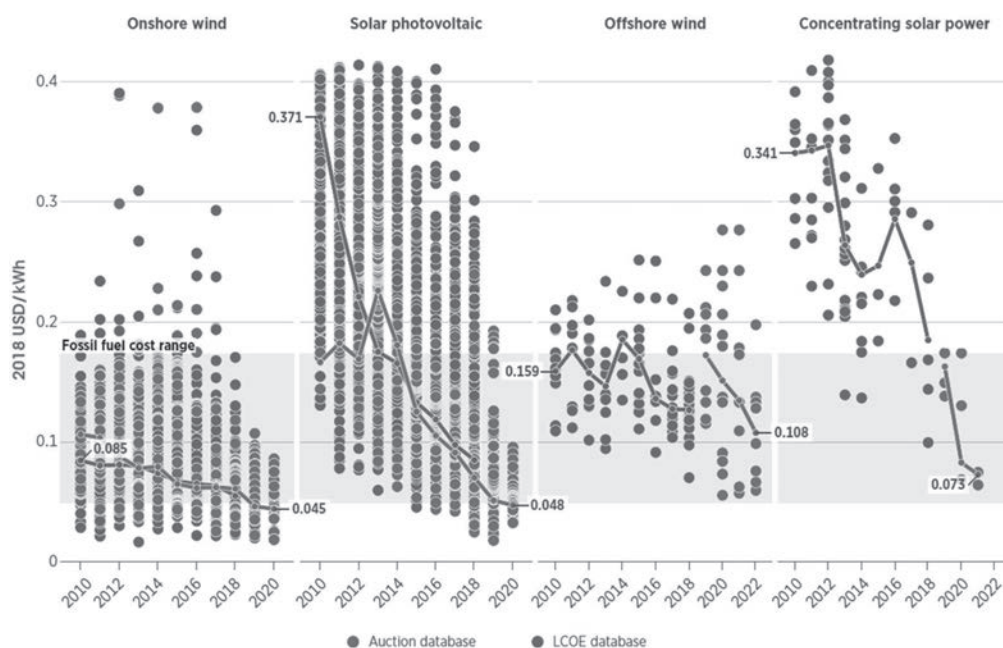


図5 電化が進展する正のスパイラル



出所：Renewable Power Generations Costs in 2018 (IRENA)

図4 再生可能エネルギーの均等化発電原価(LCOE)の推移⁽³⁾

4. 電化推進の障壁

現状ではこのスパイラルが自律的に働く状況には至っていない。働かせるための環境整備として最大のもは、エネルギー基本計画に「再生可能エネルギーの主力電源化」である。原子力発電も同じCO₂フリーの電源であり、理論上はこちらを活用することもよいのだが、原子力発電は極力依存度を減らすと位置づけられている。日本政府の「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」では、水素利用技術やカーボンリサイクル技術に電化よりもスポットが当たっているよう見えるが、これら技術を実装するにも、水の電気分解や、CO₂の分離回収・貯留・利用のプロセスで使うエネルギーがCO₂フリーでなければ意味がないので、CO₂フリーの電気はここでも大量に必要な。人口光合成やバイオマスは電気を使わない可能性があるが、大量にエネルギーを確保することは難しいと思われるので、長期戦略で語られている範囲で脱炭素社会が実現するとすれば、それは、二次エネルギーである電気が事実上一次エネルギーになる世界ということもできるだろう。

加えて、電気機器の導入に際して働く「ロックイン効果」と呼ばれるものも克服すべき課題であるが、これは別稿に委ねる。

法制度面の環境整備も必要である。一例としてエネルギーの使用の合理化等に関する法律（以下「省エネ法」）を取りあげる。省エネ法は、1979年の成立・施行であり、原油消費削減が至上命題であった石油危機の時代背景を今も引きずっている。一定規模以上の需要家（事業者）にエネルギーに関する定期報告を行う義務と、年率1%程度の省エネルギーに努力する義務が課しているが、その報告では石油換算単位であり、需要家が消費した電力量は、火力発電所の発電効率に基づいた換算係数を用いて一次エネルギーに換算される。電源構成が変動しても、再生可能エネルギーの比率が上昇しても換算方法は変わらない。つまり、再生可能エネルギーによる電気も省エネ法上は火力発電の電気とみなされる。

この法制度は、需要家の設備の選択に重大な混乱を招く。需要家が化石燃料を直接燃焼させる設備を電気設備にリプレースし、再生可能エネルギーの電気を一定割合購入して設備を稼働させた場合、CO₂排出量は減るが、省エネ法に基づく一次エネルギー消費量は増加してしまうため、需要家が電気設備の導入を躊躇するということが起こり得る。エネルギー消費を須らく石油消費とみなして評価するとい

う現状の法制度は、石油危機時代のレガシーであり、脱炭素化を目指す時代にあっては、需要家に歪んだインセンティブを与えてしまっている。自然変動性の再生可能エネルギーは、時間帯によっては余剰となることもあるエネルギーであり、その場合は、エネルギー効率に拘らずに余剰のエネルギーを活用して、化石燃料消費を抑制することは、脱炭素社会を目指す価値観には合致するが、省エネ法上は的確に評価されない。政府の「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」で掲げたように、ビジネス主導による非連続なイノベーションを経済成長につなげていくには、民間事業に正しいインセンティブを与える政策が重要である。省エネ法に限らず、こうした観点から現在の法制度を再点検することが求められる。

5. 参考文献

- 1) 経済産業省, 総合資源エネルギー調査会 基本政策分科会 (第27回会合) 資料1, 3 (2018) 一部加工
- 2) Deep Decarbonization Pathways Project, pathways to deep decarbonization 2015 report, 8 (2015)
- 3) International Renewable Energy Agency, "Renewable Power Generations Costs in 2018", Figure S.3 (2019)
- 4) 竹内純子, 伊藤剛, 岡本浩, 戸田直樹, エネルギー産業の2050年 Utility3.0へのゲームチェンジ, 14 - 21 (2017) 日本経済新聞社

著者略歴



戸田直樹 (トダナオキ)

1985年 東京大学工学部卒業 東京電力株式会社 (現東京電力ホールディングス株式会社) 入社

以来 同社企画部にて、電力システム改革を長らく担当。2009年から2年間 電力中央研究所社会経済研究所派遣 (上席研究員)

2015年 東京電力ホールディングス株式会社 経営技術戦略研究所 経営戦略調査室長

2016年より 現職

著作はいずれも共著で

電力システム改革の検証 (2015年 白桃書房),

まるわかり電力システム改革キーワード360 (2015年 日本電気協会新聞部)

エネルギー産業の2050年 Utility3.0へのゲームチェンジ (2017年 日本経済新聞社)