

CO₂の長期大規模削減と電化

—排出制約下における電化の促進と電力需要の関係性—

Long-Term Deep CO₂ Emissions Reduction and Electrification

キーワード：電化、電力需要、シナリオデータベース

坂 本 将 吾

CO₂の長期大規模削減には電化の促進が必要と考えられているが、「電化率」という最終エネルギー消費に占める電力の比率が増加する場合でも、電力需要の「総量」の変化には増加・一定・減少のすべての可能性がある。本稿では、IPCCの第5次評価報告書(AR5)で用いられたシナリオデータベースと、温暖化研究における共通の社会経済シナリオとして近年提案されている共有社会経済パス(SSP)のシナリオデータベースを用いて、排出制約下における電化促進と電力需要の関係を、世界全体を対象に分析した。シナリオ間の平均的な傾向として、排出制約が弱い場合には、電力需要と最終エネルギー消費の両方が増加する形で電化率が高まる。他方、排出制約が強い場合は、電力需要の増加ペースは排出制約が弱い場合よりも緩くなるが、他の最終エネルギー消費はそれ以上に増加が緩まるため、結果的に電化率が一層高まる。ただし、シナリオ間の分布をみると、排出制約が強い場合の方が電力需要の増加ペースが速くなるシナリオが約半数を占める。つまり、排出制約が強い場合に電化率が高まるのは共通した傾向だが、電力需要の増加ペースの変化については、ばらつきが大きい。GDPあたりの電力需要は、排出制約の強弱によらず2100年にかけて減少するが、他の最終エネルギー消費と比較して減少率は小さく、排出制約間でも差は小さい。排出制約が強いシナリオでは、需要部門の電化進展にあわせて、電力供給が低炭素化する。

1. はじめに
 - 1.1 CO₂排出削減のための電化
 - 1.2 電化と電力需要
 - 1.3 研究の目的
2. 電化率・電化パターン
 - 2.1 電力需要・最終エネルギー消費・電化率の関係
 - 2.2 電化パターンの定義と分析視点
 - 2.3 電力需要/GDP・最終エネルギー消費/GDP・電化率の関係
3. 排出制約と電化・電力需要
 - 3.1 使用するシナリオデータ
 - 3.2 世界全体における電化
 - 3.3 電力需要/GDP・最終エネルギー消費/GDPと電化率の関係
 - 3.4 地域別の電化
 - 3.5 需要部門別の電化
 - 3.6 運輸部門における電化
 - 3.7 供給部門の低炭素化と需要部門の電化
4. おわりに

1. はじめに

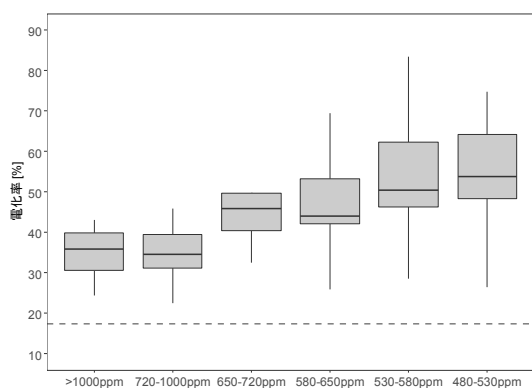
1.1 CO₂排出削減のための電化

CO₂の大規模削減のためには、エネルギー利用の効率化や省エネルギー、電力供給の低炭素化に加えて、エンドユースの低炭素化（電力、水素、バイオエネルギーへの転換）が必要であると指摘されている（Deep Decarbonization Pathway Project（以下、DDPP），2015）。

エンドユースの低炭素化においては、給湯や

暖房、自動車に多く利用されている直接燃焼から、より効率的でエネルギーサービスを多様な方法で供給可能なエネルギーキャリアである電力への転換が、有力な選択肢とされている。

Sugiyama（2012）は、排出制約が厳しくなるほど最終エネルギー消費に占める電力の割合（電化率）が高くなる傾向（電化）が、さまざまな機関（国際エネルギー機関（IEA）、Eurelectric、世界自然保護基金（WWF）、電力中央研究所）の研究において共通していることを



出典：AR5シナリオデータベースを用いて著者作成（技術制約は区別せずデータを抽出）。横軸は、2100年におけるCO₂濃度であり、ppmが小さいほど排出制約が厳しいことを意味する。横点線は2010年の電化率（約17%）。

図1 排出制約と電化率
(世界全体・2100年)

整理している¹。

また、気候変動に関する政府間パネル (IPCC) の第5次評価報告書 (以下、AR5) では、図1のように、シナリオ間の傾向として、CO₂の排出量制約が強くなるにつれて、電化が進む傾向が示されている (IPCC, 2014)。

国単位での電化の分析として、DDPP (2015) は、16カ国の大規模削減達成を測る指標のひとつとして、最終エネルギー消費量に占める電力の割合 (電化率) を挙げており、すべての対象国において、2050年の電化率の増加が必要であるとしている²。都市単位での電化の分析として、カリフォルニア (Williams, 2012; Yang et al., 2015) やカナダの諸都市 (Canadian Energy Research Institute, 2017) を対象に、排出制約下における電化の必要性が示されている³。

¹ 2007年の世界全体の電化率が約20%に対して、大規模削減シナリオ (CO₂濃度485ppm以下) においては2050年に世界全体の電化率が約30~55%となることを整理している。

² 対象国 (数値が明記されていない米国以外の15カ国) の2010年における電化率の中央値は19%、大規模削減シナリオにおける2050年の電化率の中央値は36%である。

³ カリフォルニアについては、Williams (2012) では1990年の電化率が19%、80%削減シナリオでの2050年の電化率は55%に、Yang et al. (2015) では民生部門で2010年の電化率が49%、80%削減シナリオで2050年に電化率は64%になる

各国政府の長期戦略においても、複数の国で、需要部門の電化が対策のひとつの方向性として位置づけられるようになっている。例えば、英国のClean Growth Strategyでは、2032年から2050年までの主要なシナリオとして、電化、水素、炭素除去技術のそれぞれを軸とした場合の3つのパスが示され、電化が大規模削減の選択肢とされている。米国の長期戦略においては、80%削減が達成可能な3つのシナリオのすべてで、2005年から2050年にかけて全需要部門の電化率が増加している⁴。カナダの長期戦略では、DDPPの大規模削減シナリオにおける電化率が増加するという結果⁵を、需要部門に関する章の冒頭で示した上で、各部門の対策を電化を中心に記載している。

1.2 電化と電力需要

従来、大規模削減シナリオにおける電化の検討では、最終エネルギー消費の合計に占める電力需要の割合で定義される「電化率」が、指標として用いられてきた。CO₂の長期大規模削減のために電化が必要という知見は、この電化率がCO₂排出量制約下で増加することが根拠とされている。

電化率の変化は、最終エネルギー消費と電力需要の変化量の大小関係から決まる。そのため、電化率が増加している場合でも、(電力以外の) 最終エネルギー消費の変化の仕方次第で、電力需要の変化には、増加・一定・減少のすべての可能性がある。つまり、電化率が増加するとい

としている。

⁴ アメリカにおける2005年の部門別の電化率は、産業部門で22%、民生部門で49%、運輸部門で0%であるのに対して、80%削減可能なシナリオでは、2050年の部門別の電化率は産業部門で54~72%、民生部門で74~79%、運輸部門で24~29%となっている。

⁵ Pathways to deep decarbonization in Canada では2050年でベースラインでは電化率が25%にとどまるが、大規模削減シナリオでは電化率が43%になるとしている。

う意味で電化が進むというだけでは、必ずしも電力需要が増加しているとは限らない。

CO₂の長期大規模削減においては、電力供給の低炭素化も必要とされる。電力供給の低炭素化を進めつつ、安定供給の維持を長期間にわたって検討するには、排出制約下における需要側の電化促進により、電力需要が増加するか、減少するかの見通しを得る必要がある。したがって、電化率が増加する際に、電力需要が増加・一定・減少の場合を区別し、電化に伴う電力需要の規模についての見通しも合わせて持つ必要がある。既存研究の電化の議論では、電力需要の変化も検討されてきたが、電化の促進という点では、わかりやすい電化率を指標とした議論に偏りがちであり、こうした区別はなされてこなかった。Sugiyama (2012) は、CO₂排出量制約の強化に伴って、電力需要が増加・減少するシナリオがそれぞれあることを示しているが、その時点では分析対象に含めることができないシナリオの数が限られていた。

1.3 研究の目的

本稿では、CO₂の大規模削減に必要とされる電化の度合いを整理しつつ、電化率の増減に加えて、電化による電力需要の変化にも注目しながら、排出制約と電化の関係についての知見を得ることを目的とする。なお、本稿においても従来と同様、最終エネルギー消費の合計に占める電力の割合を「電化率」と定義し、電化率が増加することを「電化」と呼ぶ。

本稿の構成は以下のとおりである。2章では、電力需要・最終エネルギー消費・電化率の関係性を整理した上で、電化パターンを設定する。3章では、分析に使用するIPCCのAR5とShared Socioeconomic Pathway (以下、SSP) のシナリオデータベースを説明した上で、排出制約と電化の関係の分析結果を示す。ここでは電力供給部

門と需要部門の電化の関係についても考察を行う。最後に、4章でまとめを述べる。

2. 電化率・電化パターン

2.1 電力需要・最終エネルギー消費・電化率の関係

電力需要をE、最終エネルギー消費をDとすると、電化率RはE/Dで定義される。この定義より、横軸をD、縦軸をEとした場合、原点を通る直線の傾きがRとなる(図2)。同一直線上では、すべての電力需要と最終エネルギー消費の組み合わせで同じ電化率となる。

2.2 電化パターンの定義と分析視点

任意の電力需要E、最終エネルギー消費D、電化率R (=a) の組み合わせから、別の組み合わせへと変化することによる電化の仕方には、3つのパターン(以下、電化パターンと呼ぶ)がある(電力需要の変化量をΔE、最終エネルギー消費量の変化量をΔDとする)。

1つ目は、電力需要は増加する(ΔE>0)が、最終エネルギー消費は減少する場合(ΔD<0)である。これを電化(強)と呼ぶ。2つ目は、電

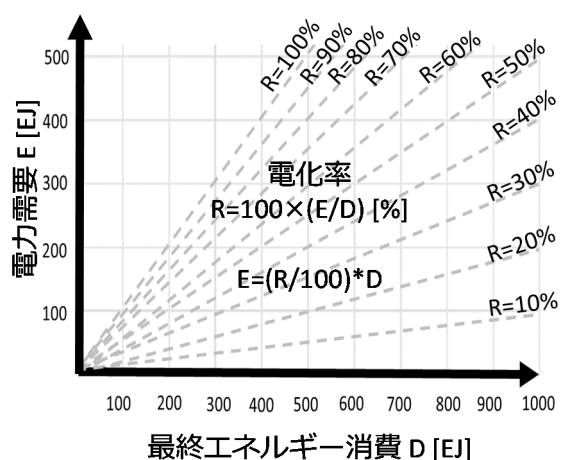


図2 電力需要・最終エネルギー消費・電化率

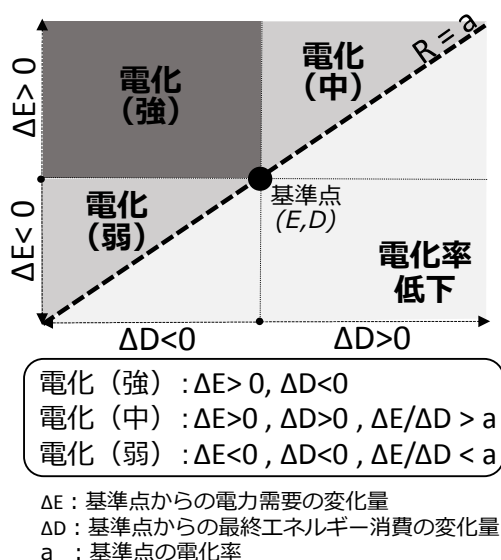


図3 電化パターン

力需要と最終エネルギー消費がともに増加する ($\Delta E > 0, \Delta D > 0$) が、電力需要の増加と最終エネルギー消費の増加の比率が元の電化率よりも大きい場合 ($\Delta E / \Delta D > a$) である。これを電化 (中) と呼ぶ。3つ目は、電力需要と最終エネルギー消費がともに減少する ($\Delta E < 0, \Delta D < 0$) が、電力需要の増加と最終エネルギー消費の増加の比率が元の電化率よりも小さい場合 ($\Delta E / \Delta D < a$) である。これを電化 (弱) と呼ぶ。

図3に、図2における任意の電力需要と最終エネルギー消費、電化率の組み合わせを示す点 (図中●印、以下「基準点」と呼ぶ) を基準とした場合の電化パターンを示す。基準点を原点とした場合に、比較対象がどの象限にあるかによって、電化パターンは区別される。

電化が進む場合に電力需要が増加するのは、電化 (強) と電化 (中) である。電化 (強) では、電力以外の最終エネルギー消費が減少する一方で、電力需要が増加するため、電力がより中心的な役割を担う方向ではあるが、電力需要の増加自体は小さくても電化率は増加する。電化 (中) では、最終エネルギー消費も増加しているため、電化率は上がりにくい、仮に同じ

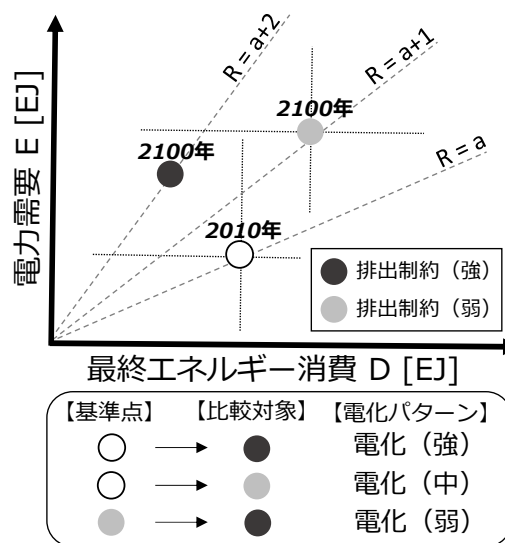


図4 基準点・比較対象・電化パターンの例

だけ電化率が増加した場合には、電化 (強) よりも電力需要は大きくなる。つまり、電化率の増加分が同じ場合でも、電化パターンが異なれば電力需要も異なる。本研究では、電化パターンを分けた上で電化と電力需要の関係を整理する。

なお、基準点は任意であり、選択した基準点と比較対象の組み合わせごとに電化パターンが決まる (図4に例を示す)。このように電化パターンを定義した上で、以下の分析では、① 2010年を基準点とした場合に、将来年に電化パターンがどのように変化するか、そして、②同じ時点において排出制約が弱いシナリオを基準点とした時に、排出制約が強いシナリオで電化パターンがどう変化するかを考察する。

①について、世界全体で見れば、今後も経済成長は続くため、排出制約がなければ、最終エネルギー消費・電力需要ともに増加傾向が続くと予想される。そのため、2010年を基準点として、2050年や2100年など将来時点と比較対象とする場合には、基本的には電化 (中) が続いていくと予想され、このような中で、排出制約を強化すると、電化パターンがどう変化するか

に着目する。

②について、排出制約の異なるシナリオの同一時点間で、排出制約が弱いシナリオを基準点とした場合に、強いシナリオにおける電力需要の方が大きいかどうかは、一概には判断できない（図4ではあくまでも例として減少する場合を示している）。CO₂大規模削減における電化と電力需要を捉えるという観点では、②の比較がより重要であると考えられる。

2.3 電力需要/GDP・最終エネルギー消費/GDP・電化率の関係

本稿では、電力需要・最終エネルギー消費の総量だけではなく、GDP（Y）あたりの電力需要（E/Y）とGDPあたりの最終エネルギー消費（D/Y）についても、同様の分析を行う。図2～図4は、横軸と縦軸にE/YとD/Yとした場合でも同じ整理が可能となる。

これにより、時点間や地域間の経済規模の違いを基準化した経済活動あたりの電力需要・最終エネルギー消費から、電化パターンを分析することができる。特に先進国（OECD）と途上国（Non-OECD）の間で、電化の促進や経済活動あたりの電力需要が長期的にどのように異なるかを分析する。

3. 排出制約と電化・電力需要

3.1 使用するシナリオデータ

本稿の分析では、既存のシナリオ分析の結果を用いる。これにより、さまざまな機関の分析における共通した傾向を把握できる。具体的には、AR5とSSPのシナリオデータベースを使用する。AR5シナリオデータベースは、IPCCがAR5に掲載している結果の元となるデータを

公表しているものである。SSPは、気候変動対策の評価における共通の社会経済シナリオとして用いられており、気候変動の緩和（排出削減）と適応の困難度に応じた5種類（SSP1～SSP5）が用意されている。

AR5とSSPは、それぞれ以下のような特徴がある。

AR5では、シナリオ数は1000程度あり、結果を提出しているモデル数も多く、需要部門別の電化を分析できる。ただし、AR5発行前の2009～13年の分析結果であり、また、参加しているモデルは必ずしも実績の多いモデルだけではない。その上、地域別の電力需要の計算結果が公表されておらず、このデータベースだけでは、地域間の相違を検討できない。

一方、SSPのシナリオデータベースでは、統合評価モデルの研究コミュニティで中心的な役割を果たしているモデルがシナリオ分析結果を提供しており、さらに、地域別に電力需要が公表されている。しかし、シナリオは、5種類の社会経済シナリオと代表濃度経路（RCP⁶）4区分の組み合わせのうち、解が得られるシナリオに限られており、モデル数も少なく、需要部門別には電力需要が公表されていない。

本稿では、AR5とSSPで共通して把握可能な世界全体の電化については、両者をあわせて分析する。公表年が新しいSSPの結果のほうが、最新の情報をモデル分析に取り入れているため、AR5の結果よりも妥当性が高くなっていると考えられることもできる。しかしながら、SSPでは、モデル数が少なく、データベースの作成を国際的なモデルチームが協調して進めた経緯があり、AR5と比べて結果の多様性が損なわれている可能性も否定できない。このように一長一短であるため、本研究では、可能な限り、両

つのCO₂排出量のパスのこと。

⁶ 代表濃度経路（RCP）とはシナリオ分析における共通の排出パスとして用いられるものであり、2100年における放射強制力（8.5 W/m²、6.0 W/m²、4.5 W/m²、2.6 W/m²）に応じた4

者を合わせて分析することとした。

なお、AR5には、削減技術の利用を制限するシナリオも含まれるが、本稿では、排出制約と電化の關係に着目するため、削減技術の利用の制限がないシナリオ⁷のみを使用する。また、AR5で使用する削減技術の利用の制限がないシナリオでは、社会経済シナリオはトレンドのまま推移するとみなせるが、SSPでは、5種類のシナリオのうち、中道シナリオであるSSP2のみが、社会経済シナリオとしてはトレンドで推移している。本稿では、AR5とあわせて用いるために整合性を考慮して、SSP2のみを使用する⁸。

また、シナリオデータの入手の制限があるため、地域別の分析にはSSP2のみ、需要部門別の分析にはAR5のみを使用する。AR5とSSP2をあわせた世界全体の結果と、AR5、SSP2のみを用いる地域別と需要部門別の結果との対応關係を把握できるよう、世界全体の結果についてはAR5とSSP2を分けた結果もあわせて示す。

CO₂排出制約は、2100年におけるCO₂濃度の制約を>720ppm、530~720ppm、430~530ppmと区

表1 分析に用いるシナリオ数

	>720ppm	530~720ppm	430~530ppm	使用データベース
全部門	156	189	86	AR5、SSP2
世 産業部門	10	28	20	AR5
界 民生部門	8	23	15	AR5
運輸部門	32	35	7	AR5
地 OECD	10	8	6	SSP2
域 Non-OECD	24	32	40	SSP2

⁷ AR5 シナリオデータベースでは複数のモデル比較プロジェクトを整合させるカテゴリーがある。削減技術の制約の有無は「TECHNOLOGY」カテゴリー (T0-T3) であり、本稿では T0 (ネガティブエミッションあり、技術制約なし) と T3 (ネガティブエミッションなし、技術制約なし) を使用。

⁸ SSP では、SSP1~SSP5 それぞれ代表したモデルが作成したマーカーシナリオがあるが、それ以外のモデルもそれぞれの SSP シナリオの結果を提出している。本稿では提出されているすべてのシナリオを分析に使用する。

分して設定した⁹。使用するシナリオ数を表1に示す¹⁰。各CO₂排出制約に対して複数のモデルの結果があり、それらのばらつきは大きい。本稿では、シナリオ群でばらつきがある中で、中央値がシナリオ群の傾向を示す指標であると考へ、すべて中央値で考察する。なお、共通した傾向は中央値で考察するが、個別のモデルの結果のばらつきも適宜整理することで、中央値が示す傾向の代表性についても確認する。

3.2 世界全体における電化

図5に、2010年から2100年における世界の全部門合計の電力需要、最終エネルギー消費、電化率の關係を、CO₂排出制約別に示す (図はそれぞれAR5+SSP2、AR5のみ、SSP2のみ)。表2に、基準点と比較対象ごとに、電化パターン、電力需要の変化 (ΔE)、最終エネルギー消費の変化 (ΔD)、電化率の変化 (ΔR) を整理した。

はじめに、2010年を基準点とし、比較対象を2050年及び2100年とすると、電化率は、CO₂排出制約の強さに関わらず、2050年及び2100年にかけて増加¹¹しており、継続的に電化が進んでいる。電化が進む際、電力需要と最終エネルギー消費はともに、CO₂排出制約によらず2100年まで増加していることから、電化パターンは、排出制約間で共通して、電化 (中) である。

ただし、CO₂排出制約が最も弱い場合 (>720ppm) に対して、強い場合 (530~720ppm、430~530ppm) では、電力需要、最終エネルギー消費の増加がともに緩やかになる。最終エネ

⁹ SSP シナリオデータベースでは RCP で報告されているが、AR5 と整合させるため CO₂濃度に換算した。

¹⁰ 部門別は電力以外の最終エネルギー消費もすべて報告されているシナリオを使用しているが、全部門についてすべての種類の最終エネルギー消費を報告しているシナリオはなく、部門ごとに抽出したため使用シナリオ数が異なる。

¹¹ 2010 年に対して、>720ppm では 2050 年に 9%、2100 年に 17%増加、530~720ppm は 2050 年に 11%、2100 年に 23%増加、430~530ppm は 2050 年に 16%、2100 年に 33%増加。

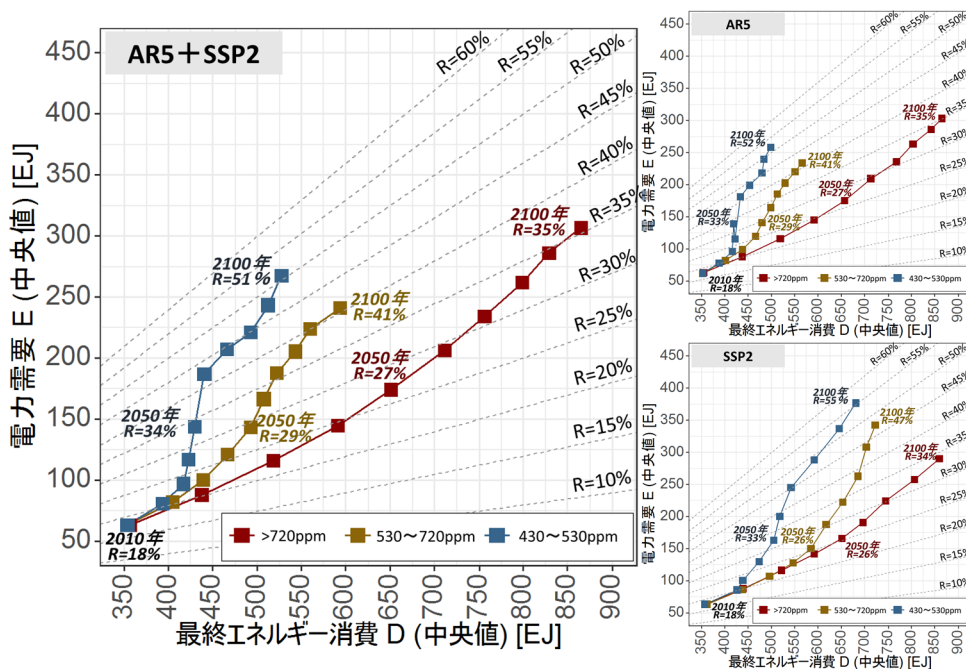


図5 排出制約と電力需要・最終エネルギー消費・電化率の関係（世界・全部門）

表2 排出制約間の電力需要・最終エネルギー消費・電化率の差
(AR5+SSP2) (世界・全部門)

基準点	比較対象	電化 パターン	ΔE [EJ]	ΔD [EJ]	ΔR [%]
2010年	2050年 (>720ppm)	中	111	294	9
	2050年 (530~720ppm)	中	80	139	11
	2050年 (430~530ppm)	中	81	76	16
2010年	2100年 (>720ppm)	中	243	508	18
	2100年 (530~720ppm)	中	178	241	23
	2100年 (430~530ppm)	中	204	174	33
2050年 (>720ppm)	2050年 (530~720ppm)	弱	-31	-158	2
	2050年 (430~530ppm)	弱	-30	-221	7
2100年 (>720ppm)	2100年 (530~720ppm)	弱	-66	-271	6
	2100年 (430~530ppm)	弱	-39	-337	16

※ ΔE 、 ΔD 、 ΔR ：それぞれ基準点と比較対象の電力需要、最終エネルギー消費、電化率の差

ギー消費の増加が緩やかになる程度¹²と比較して、電力需要が緩やかになる程度¹³は小さい¹⁴。

次に、>720ppmの2050年、2100年を基準点として、比較対象を、同じ時点のCO₂排出制約が強い場合(530~720ppm、430~530ppm)とすると、制約が強い場合の方が、電力需要も最終エネルギー消費も小さい電化(弱)のパターンで電化

率が高い¹⁵。

つまり、CO₂排出制約が強い場合の方が電力需要は低い、電力以外のエネルギー消費はそれ以上に落差があるので、電化が一層進むことになる。

ただし、中央値だけではなく、2100年における排出制約間 (>720ppmと530~720ppm、

¹² 最終エネルギー消費の差は、2010年と比較して、2050年に>720ppmは294[EJ]、430~530ppmは76[EJ]増加、2100年に>720ppmでは508[EJ]、430~530ppmでは174[EJ]増加。

¹³ 電力需要の差 ΔE は、2010年と比較して、2050年に>720ppmは111[EJ]、430~530ppmは81[EJ]増加、2100年に>720ppmでは243[EJ]、430~530ppmでは204[EJ]増加。

¹⁴ 2100年の>720ppmと430~530ppmの差の比率をとると、 Δ

Dは34%(174/508)、 ΔE は84%(204/243)であり、 ΔE のほうが排出制約間の増加量の差が小さい。

¹⁵ >720ppmの電化率に対して、530~720ppmは2050年で2%、2100年で6%、430~530ppmは、2050年で7%、2100年で16%高い。

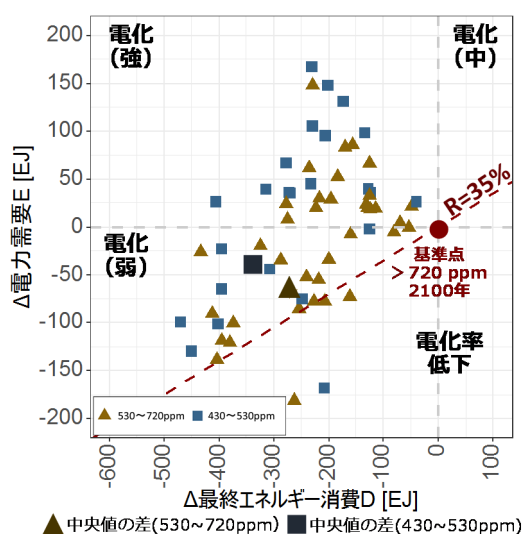


図6 2100年における排出制約間の電力需要、最終エネルギー消費の差

>720ppmと430~530ppm)の電力需要の差¹⁶をみると(図6)、CO₂排出制約が強い場合における電力需要のばらつきが大きい。最終エネルギー消費は、CO₂排出制約が強い場合の方がすべて小さいのに対して、電力需要は、CO₂排出制約が強い場合の方が大きい場合もあることがわかる。

したがって、中央値でみると、CO₂排出制約が弱い場合の電力需要が一番大きく、CO₂排出制約が強い場合に電力需要の増加は鈍化する傾向にあるが、シナリオ間のばらつきは大きい。2100年といった長期にわたる電力需要の変化の想定には、まだ共通した傾向は示されておらず、議論の余地が残されていると考える。この

点については、3.5において、CO₂排出制約による電力需要の変化を部門別に見ることで、再度考察する。

3.3 電力需要/GDP・最終エネルギー消費/GDPと電化率の関係

2010年から2100年における世界の全部門合計のGDPあたり電力需要(ΔE/Y)、GDPあたり最終エネルギー消費(ΔD/Y)、電化率の関係を、CO₂排出制約別に図7に示す(図はそれぞれAR5+SSP2、AR5のみ、SSP2のみ)。表3に、基準点と比較対象の組み合わせごとに、電化パターン、GDPあたり電力需要の変化(ΔE/Y)、GDPあたり最終エネルギー消費の変化(ΔD/Y)、電化率の変化(ΔR)を整理した。

GDPあたり電力需要、GDPあたり最終エネルギー消費は、2010年を基準点とした場合に、2050年と2100年のどちらにおいても減少している¹⁷が、GDPあたり電力需要の方が減少率は小さい¹⁸。

>720ppmにおける2050年及び2100年を基準点として、比較対象を同じ時点のCO₂排出制約が強い場合(530~720ppm、430~530ppm)とすると、GDPあたり最終エネルギー消費よりも、GDPあたり電力需要の方が、CO₂排出制約間での差が小さい¹⁹。つまり、GDPあたり電力需要は、他のエネルギー消費と比較してCO₂排出制約の強化に影響されにくい。

¹⁶ 排出制約ごとの各モデルの電力需要、最終エネルギー消費の平均を算出し、排出制約間の電力需要、最終エネルギー消費の平均の差を算出した。

¹⁷ GDPあたり電力需要は、2010年と比較して、2050年に>720ppmでは0.21[MJ/US\$]、530~720ppmでは0.38[MJ/US\$]、430~530ppmでは0.34[MJ/US\$]減少、2100年に>720ppmでは0.49[MJ/US\$]、530~720ppmでは0.60[MJ/US\$]、430~530ppmでは0.47[MJ/US\$]減少。GDPあたり最終エネルギー消費は、2010年と比較して、2050年に>720ppmでは3.24[MJ/US\$]、530~720ppmでは3.98[MJ/US\$]、430~530ppmでは4.30[MJ/US\$]減少、2100年に>720ppmでは4.97[MJ/US\$]、530~720ppmでは5.46[MJ/US\$]、430~530ppmでは

5.49[MJ/US\$]減少(ドルはすべて2005年換算)。

¹⁸ GDPあたり最終エネルギー消費は2010年に対して、2100年では70~78%の減少率であるが、GDPあたりの電力需要は38~48%の減少率である。

¹⁹ GDPあたり最終エネルギー消費は、>720ppmに対して、2050年では、530~720ppmは22%、430~530ppmは31%小さい。2100年では530~720ppmは28%、430~530ppmは30%小さい。GDPあたりの電力需要は、>720ppmに対して、2050年では、530~720ppmは16%、430~530ppmは13%小さい。2100年では530~720ppmは14%小さく、430~530ppmは3%大きい。

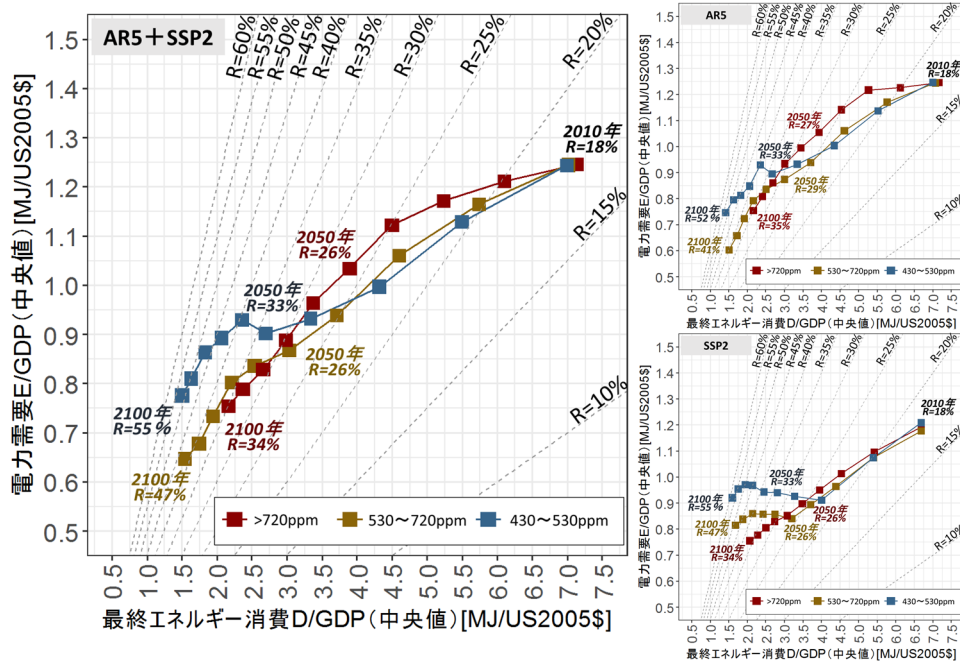


図7 電力需要/GDP・最終エネルギー消費/GDP・電化率の関係（世界・全部門）

表3 電力需要/GDP・最終エネルギー消費/GDP・電化率の関係
(AR5+SSP2) (世界・全部門)

基準点	比較対象	電化 パターン	$\Delta E/Y$ [MJ/\$]	$\Delta D/Y$ [MJ/\$]	ΔR [%]
2010年	2050年 (>720ppm)	弱	-0.21	-3.24	9
	2050年 (530~720ppm)	弱	-0.38	-3.98	11
	2050年 (430~530ppm)	弱	-0.34	-4.30	16
2010年	2100年 (>720ppm)	弱	-0.49	-4.97	18
	2100年 (530~720ppm)	弱	-0.60	-5.46	23
	2100年 (430~530ppm)	弱	-0.47	-5.49	33
2050年 (>720ppm)	2050年 (530~720ppm)	弱	-0.17	-0.86	2
	2050年 (430~530ppm)	弱	-0.13	-1.20	7
2100年 (>720ppm)	2100年 (530~720ppm)	弱	-0.11	-0.62	6
	2100年 (430~530ppm)	弱	0.02	-0.66	16

※ $\Delta E/Y$ 、 $\Delta D/Y$ 、 ΔR ：それぞれ基準点と比較対象の電力需要/GDP、最終エネルギー消費/GDP、電化率の差

3.4 地域別の電化

SSP2シナリオデータのみを用いて、先進国 (OECD) と途上国 (Non-OECD) における排出制約と電化の関係を分析する (図8、図9)。また、表4と表5には、基準点と比較対象の組み合わせごとの電化パターン、電力需要の変化 (ΔE)、最終エネルギー消費の変化 (ΔD)、GDPあたり電力需要の変化 ($\Delta E/Y$)、GDPあたり最終エネルギー消費の変化 ($\Delta D/Y$)、電化率の変化 (ΔR) を地域別に整理した。

なお、図5で示したとおり、SSP2のみの場合

では、AR5+SSP2の場合とは異なり、中央値で見ても、CO₂排出制約が強い場合に電力需要が増加する電化 (強) となっている点に留意する必要がある。

はじめに、図8に示した地域別の電力需要・最終エネルギー消費・電化率の関係について考察する。OECD、Non-OECDともに、2010年から2050年及び2100年にかけて、CO₂排出制約によらず、電力需要、最終エネルギー消費ともに増加している。

OECDでは、2010年から2050年及び2100年に

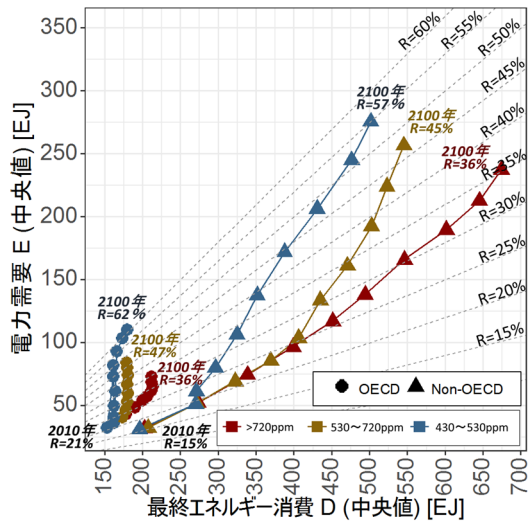


図8 地域別電力需要・最終エネルギー消費・電化率の関係 (SSP2のみ)

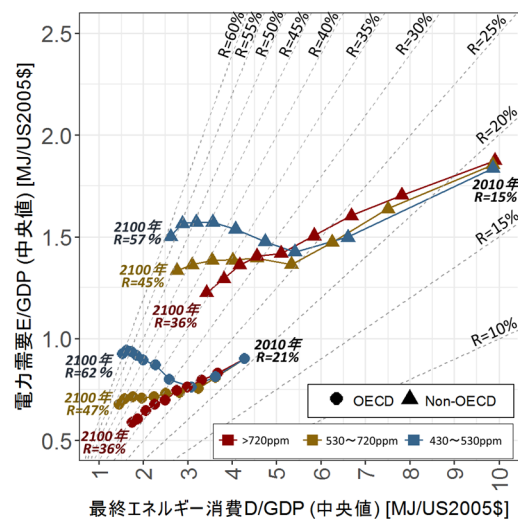


図9 地域別電力需要/GDP・最終エネルギー消費/GDP・電化率の関係 (SSP2のみ)

表4 地域別の電力需要・最終エネルギー消費・電化率の関係 (SSP2のみ)

地域	基準点	比較対象	電化パターン	ΔE [EJ]	ΔD [EJ]	ΔR [%]
OECD	2100年 (>720ppm)	2100年 (530~720ppm)	強	+11	-34	+11
		2100年 (430~530ppm)	強	+37	-32	+26
Non-OECD	2100年 (>720ppm)	2100年 (530~720ppm)	強	+19	-129	+9
		2100年 (430~530ppm)	強	+38	-173	+21

※ ΔE 、 ΔD 、 ΔR ：それぞれ基準点と比較対象の電力需要、最終エネルギー消費、電化率の差

表5 地域別の電力需要/GDP・最終エネルギー消費/GDP・電化率の関係 (SSP2のみ)

地域	基準点	比較対象	電化パターン	$\Delta E/Y$ [MJ/\$]	$\Delta D/Y$ [MJ/\$]	ΔR [%]
OECD	2100年 (>720ppm)	2100年 (530~720ppm)	強	+0.09	-0.30	+11
		2100年 (430~530ppm)	強	+0.33	-0.21	+27
Non-OECD	2100年 (>720ppm)	2100年 (530~720ppm)	強	+0.11	-0.67	+9
		2100年 (430~530ppm)	強	+0.28	-0.82	+21

※ $\Delta E/Y$ 、 $\Delta D/Y$ 、 ΔR ：それぞれ基準点と比較対象の電力需要/GDP、最終エネルギー消費/GDP、電化率の差

かけての電力需要の増加は、CO₂排出制約が強いほど大きいですが、最終エネルギー消費はある時点からほぼ増加しなくなり、その結果、電化が一層進んでいる。最終エネルギー消費の増加が止まる時期は、CO₂排出制約が強い場合ほど早い。他方、Non-OECDでは、2100年まで最終エネルギー消費の増加が続く点が、OECDとは異なっているが、CO₂排出制約が強い場合に増加が緩やかになり、電化率が高くなっている点は共通している。

次に、図9に示した地域別のGDPあたり電力需要・GDPあたり最終エネルギー消費・電化率の関係について考察する。GDPあたり最終エネルギー消費とGDPあたり電力需要は、2010年から2100年まで、CO₂排出制約によらず、Non-OECDの方がOECDよりも大きい。OECD、Non-OECDともに、GDPあたり最終エネルギー消費は2010年から2100年にかけて減少しているが、GDPあたり電力需要は逆に増加し、CO₂排出制約が強い場合の方が大きい。

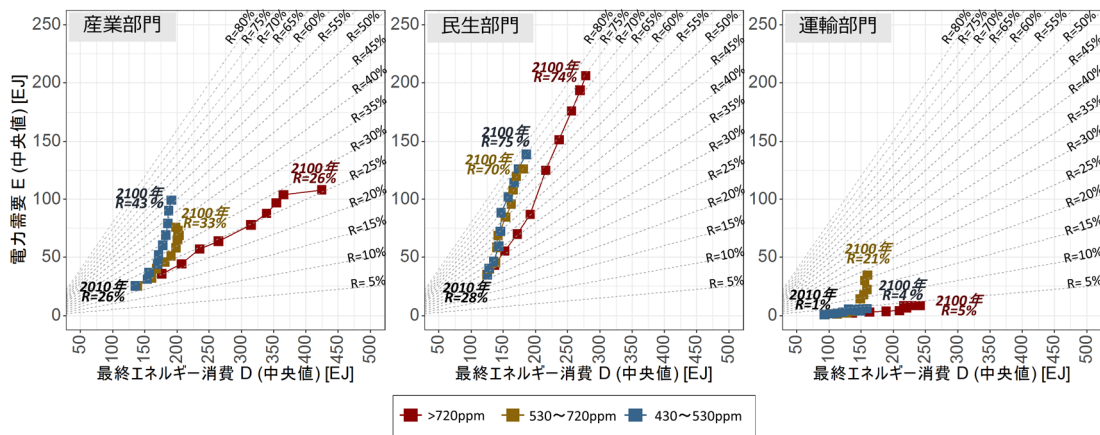


図10 部門別の電力需要・最終エネルギー消費・電化率の関係 (AR5のみ)

表6 部門別の電力需要・最終エネルギー消費・電化率の関係 (AR5のみ)

部門	基準点	比較対象	電化 パターン	ΔE [EJ]	ΔD [EJ]	ΔR [%]
産業	2100年 (>720ppm)	2100年 (530~720ppm)	弱	-32	-226	+7
		2100年 (430~530ppm)	弱	-9	-233	+17
民生	2100年 (>720ppm)	2100年 (530~720ppm)	—	-80	-97	-4
		2100年 (430~530ppm)	弱	-68	-93	+1
運輸	2100年 (>720ppm)	2100年 (530~720ppm)	強	+26	-82	+16
		2100年 (430~530ppm)	—	-3	-83	-1

※ ΔE 、 ΔD 、 ΔR : それぞれ基準点と比較対象の電力需要、最終エネルギー消費、電化率の差

3.5 需要部門別の電化

既に電化率が高い民生部門と、現時点では電化率が極めて低い運輸部門では、CO₂排出制約の強弱の違いによる電化の進み方や電力需要の大きさには違いがあると考えられる。図10、表6に、各部門における電力需要、最終エネルギー消費、電化率の関係を、CO₂排出制約別に示す。

全部門の合計の場合と同じく、部門別に見ても、CO₂排出制約によらず、すべての部門で、2010年から2100年にかけて電化率は増加するが、CO₂排出制約が強い場合には、最終エネルギー消費の増加が緩やかになる。

ただし、緩やかになる程度は部門間で差が大きく、産業部門と運輸部門では、CO₂排出制約が強い場合における2100年の最終エネルギー消費は弱い場合の半分程度となっているが、民生部門では、7割程度に留まっている。

電力需要については、傾向は複雑である。産

業部門と民生部門について、3通りの強度のCO₂排出制約を比較すると、中程度の制約の場合に、電力需要が最も小さくなる。特に、産業部門では、制約が弱い場合と強い場合の電力需要が、ほぼ同水準となる。運輸部門では、中程度の制約の場合に、電力需要が最も大きくなる。

電化以外の技術オプションも、部門ごとに異なる。民生部門では、電力と天然ガスにほぼ限定されるが、産業部門ではさまざまな生産プロセスでそれぞれに必要なエネルギーキャリアが異なる。運輸部門では、電気自動車、バイオ燃料、水素自動車という低炭素技術があるが、いずれもまだ十分普及しておらず、将来の普及の見通しは不確実である。競合する技術オプションがある場合には、将来に電化技術が主流となる可能性の見積もりが難しく、その結果、電力需要の想定も不確実になる。

こうした技術オプションの違いをみるために、図11に、2100年における各部門の最終エネ

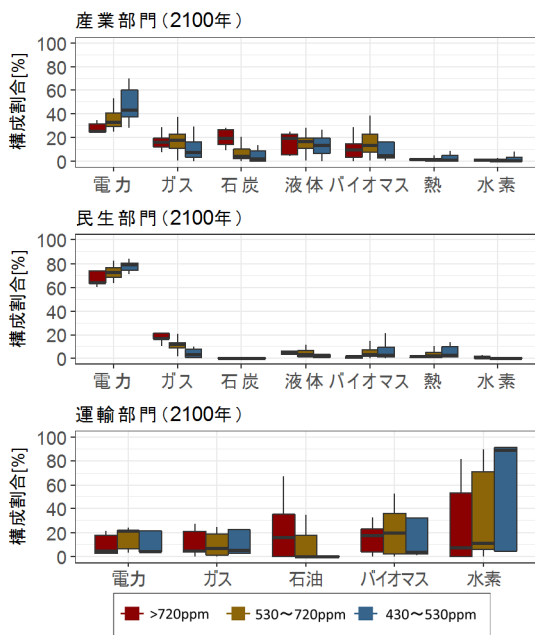


図11 世界の部門別の最終エネルギー消費の構成 (AR5のみ)

エネルギー消費の構成を示す。産業部門では、CO₂排出制約の強い場合に、電力の構成比が大きくなる一方、石炭の構成比が特に小さくなり、天然ガスと液体燃料も、同様に小さくなる。民生部門では、CO₂排出制約が強い場合に電力の構成比が大きくなり、天然ガスの構成比が小さくなる。運輸部門では、CO₂排出制約の強化に伴う電化が他部門ほど明確ではなく、電力以外のエネルギーキャリアのばらつきが非常に大きい。特に、水素のばらつきが大きく、水素が大部分を占めるシナリオから、1割程度に留まるとするシナリオもある。

産業部門では、CO₂排出制約が強い場合における電化率のばらつきが大きく、したがって電力需要のばらつきも大きい。中央値ではなく、個別のシナリオ別に、2100年におけるCO₂排出制約間 (>720ppmと530~720ppm、>720ppmと430~530ppm)の電力需要の差をみると、CO₂排出制約が強い場合に電力が大きいシナリオもあれば、そうではないシナリオもある。一方、

民生部門では、すべてのシナリオで、排出制約が強い場合に電力需要が小さい。運輸部門では、排出制約と電力需要の相関が弱い。

以上より、CO₂排出制約が強い場合の全電力需要が、弱い場合よりも大きくなるかどうかは、産業部門の電力需要の想定次第であると考えられる。

3.6 運輸部門における電化

既に述べたように、運輸部門では、低炭素化の技術オプションが多様である。そこで、運輸部門について、電化が進んでいるシナリオと進んでいないシナリオで、水素やバイオ燃料がどの程度想定されているかを分析する。

2100年における運輸部門の最終エネルギー消費の構成をモデル別に確認すると、約半数のモデルでガソリンが使われ続けると想定されており、その中で、ガソリンの割合が小さいモデルでは、ガソリン以外に電力とバイオマスが使われている。2100年時点でガソリンが使用されない残りの半数のモデルでは、水素が主流になるとするシナリオと、電力・バイオマス・天然ガスが同じ程度の割合になるとするシナリオの2つのグループがある。

運輸部門では、排出制約の違いによる電化率の違いがほとんど確認されなかったが、これは、電化が進む度合いよりも、他のエネルギーキャリアの構成比がシナリオ間でばらついているためである。最近、英国やフランスなど、複数の国が相次いで将来的なガソリン車の販売停止を表明するなど、運輸部門のEVシフトのペースが、これまでの想定よりも速くなる可能性がある。世界全体の議論と各国単位での議論では事情が異なってくるが、例えば、英国のClean Growth Strategyにおける2032年以降の3つのシナリオのうち、電化パスでは、2050年にEVのシェアが100%になっているなど、EV普及の見込みも更新されつつある。AR5時点でのEVの普

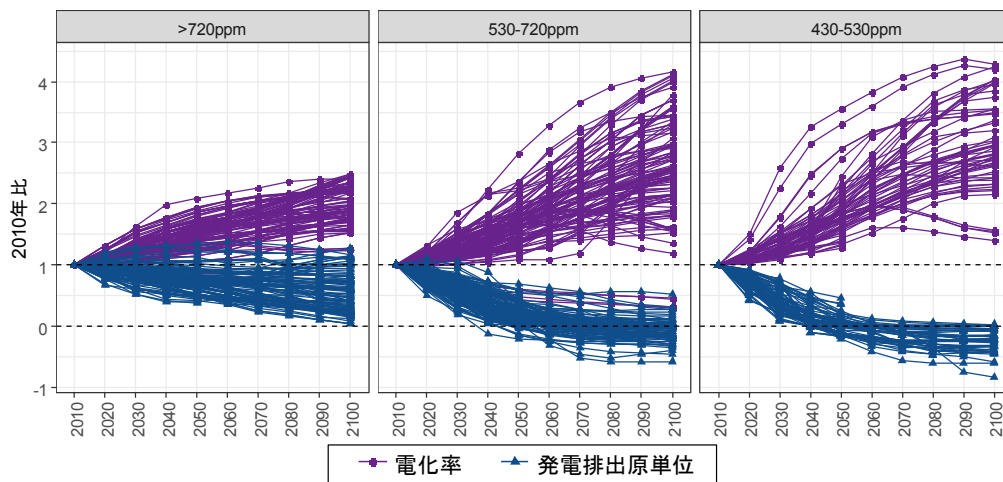


図12 発電排出原単位と需要部門の電化率の推移（2010年比）

及の想定と、近年の動向を踏まえた想定で、運輸部門の電化の進み方がどの程度変わってくるのかについて、随時シナリオ分析を更新することが重要である。

3.7 供給部門の低炭素化と需要部門の電化

大規模削減のためには、供給サイドの脱炭素化も必要であり、供給サイドの低炭素化の進み方が需要サイドの電化の進み方に影響を与える側面がある。需要部門の電化とあわせて増加した電力需要に対して、電力供給が低炭素化していなければ、CO₂排出削減への寄与が小さくなるためである。西尾・星野（2010）では、電力供給のCO₂排出原単位が異なる国の間での、電化技術（ヒートポンプ、電気自動車）の導入によるCO₂削減効果が異なることが示されている。

図12に、電力供給の低炭素化と需要部門の電化率の増加について、2010年を基準年とする変化率を示す。電力供給の低炭素化の指標は、発電量あたりのCO₂排出量（発電排出原単位）とした。この図より、需要部門の電化の進展とあわせて電力供給が低炭素化していることがわかる。また、排出制約が強いシナリオにおいて、2100年時点でほぼすべての発電排出原単位が

ゼロかマイナスとなっている。このように需要部門の電化と供給部門の低炭素化は並行して進めていく必要がある。

4. おわりに

CO₂の長期大規模削減において、電化の促進が重要とされてきたが、電化率（最終エネルギー消費に占める電力需要の割合）が増加する際に、電力需要も増加する場合もあれば、逆に減少する場合もある。本稿では、既存のシナリオデータベース（AR5、SSP）を用いて、世界全体でCO₂を大規模に削減するシナリオにおける電化率と電力需要の関係を、3つの電化パターンを設定して分析した。

排出制約が弱い場合には、2050年や2100年に向けて、電力需要も最終エネルギー消費も増加する形で、電化が進む。他方、排出制約が強い場合、電力需要は制約が弱い場合より小さくなるが、他のエネルギー消費はそれ以上に抑制されるため、電化率が一層高まる。

また、GDPあたりの電力需要は、排出制約間で差が小さいが、電力以外の最終エネルギー消費のGDPあたり消費は、排出制約が強いほど小さくなった。

部門別の電力需要は、複雑な傾向を示した。産業部門と民生部門について、3通りの強度の排出制約を比較すると、中程度の制約の時に、電力需要が最も小さくなった。特に産業部門では、制約が最も弱い場合と最も強い場合の電力需要が、ほぼ同水準となった。運輸部門では、電力だけでなく、水素やバイオ燃料など多様な将来像がシナリオ分析において想定されており、排出制約の強化に伴う電化率増加の傾向が、明確には確認されなかった。

将来時点における電力需要は、制約の強弱に関わらず増加するが、制約が強い場合の電力需要は、弱い場合よりも小さい。ただし、他の最終エネルギー消費はさらに小さくなることから、電化率は一層高まる。

しかし、シナリオを個別に見ると、約半数のシナリオで、排出制約が強い場合における電力需要が弱い場合の需要よりも大きくなる。排出制約が強い場合に電化率が大きくなることは、共通する知見と言えるが、排出制約の強弱と電力需要の大小の関係については、モデルの想定などに左右される要素が多く、安定した結果が得られていないと言える。

さらに、部門別に見てみると、産業部門では、排出制約が強い場合に電力需要が大きいシナリオもあれば、逆のシナリオもある。一方、民生部門ではすべてのシナリオで電力需要が将来にわたって増加するが、制約が強い場合の方が、弱い場合よりも小さい。運輸部門は電力需要がもともと小さいため、電化率の増加がすべて電力需要の増加となっていた。

つまり、CO₂排出制約が強い場合の全電力需要が弱い場合よりも大きくなるかどうかは、産業部門の電力需要の想定次第であると考えられる。

また、AR5シナリオデータベースに所収されたシナリオでは、近年のEVシフトの流れが考慮されておらず、今後、排出制約が強い場合に

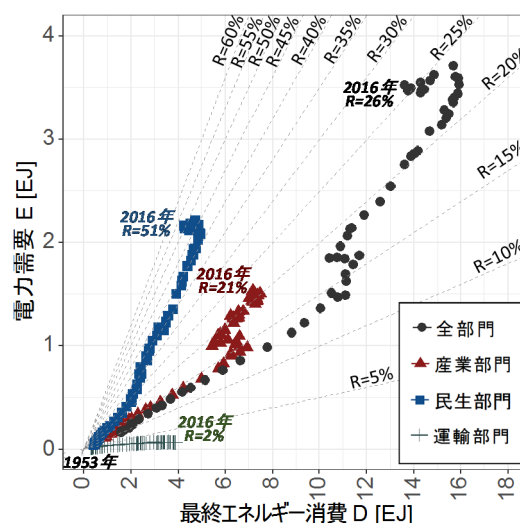


図13 日本の電力需要・最終エネルギー消費・電化率の推移（1953年～2016年）

EV化が一層進むシナリオが増えていけば、電力需要が高まる方向になるが、水素やバイオ燃料との競合がどのように進むかは、いまだ見極めが難しく、今後も継続的にシナリオ分析結果を見極めていく必要がある。

最後に、日本の電化率の推移をみると、1953年から2016年までで、全部門では10%から26%（産業部門は13%から21%、民生部門は10%から51%、運輸部門は4%から2%）まで、年率0.3%（産業は年率0.1%、民生部門は年率0.7%、運輸部門は年率-0.02%）増加してきた（図13）。

これまでは、比較的電化がしやすい民生部門により電化が進んできたが、本稿におけるシナリオデータの分析を日本にも当てはめて考えると、排出制約を満たすためには、民生部門においてもさらなる電化が必要となると考えられる。また、電化が民生部門ほど進んでいない産業部門・運輸部門の電化をどう進めていくかを検討する必要がある。

【参考文献】

西尾健一郎・星野優子 (2010) 主要7カ国の電気利用技術による CO₂ 削減ポテンシャル—家庭用ヒートポンプと電気自動車のケース分析—, 電力中央研究所報告 (Y09019)

AR5 Scenario Database;

<https://tntcat.iiasa.ac.at/AR5DB/dsd?Action=htmlpage&page=about> (アクセス日: 2017.10.1)

Canadian Energy Research Institute (2017) Greenhouse gas emissions reductions in Canada through electrification of energy services.

Deep Decarbonization Pathways Project (2015) Pathways to deep Decarbonization 2015 report.

Department for Business, Energy & Industrial Strategy (2017) the Clean Growth Strategy. Leading the way to a low carbon future.

IPCC (2014) Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press.

Williams, J.H. et al. (2012) The technology path to deep greenhouse gas emissions cuts by 2050: Pivotal role of Electricity, *Science*, 335: 53-59.

Sugiyama, M. (2012) Climate change mitigation and electrification, *Energy Policy*, 44: 464-468.

Yang, C. et al. (2015) Achieving California's 80% greenhouse gas reduction target in 2050: Technology, policy and scenario analysis using CA-TIMES energy economic systems model, *Energy Policy*, 77: 118-130.

坂本将吾 (さかもとしょうご)

電力中央研究所 環境科学研究所