

切な水準も変わり得るが、実際のエネルギー消費とのギャップが生じる要因をよく理解する上でも重要な研究と考えられる。

なお、文献 5)では、需要サイドで多く見られる小規模技術の技術進展の速さ等についても指摘がなされており、早いカーボンニュートラル化が求められている中で、需要側対策は重要である。そして、エネルギー需要側対策を誘発する因子として、デジタル化技術の大きな進展があることと、欧州の若年層等を中心に社会変化の芽も見られてきていることが挙げられる。このような中、文献 6)では、需要サイドの研究の強化の必要性が指摘されており、2022 年に出版予定の IPCC 第 3 作業部会の第 6 次評価報告書でも新たにエネルギー需要側対策に焦点を当てた章が割り当てられるなど、研究の進展が期待されている。

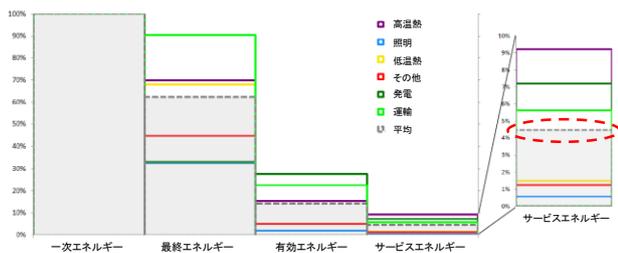


図1 世界における各エネルギー利用段階でのエネルギー消費量(一次エネルギー消費量を 100%とした場合)⁷⁾

本稿では、低エネルギー需要社会実現の機会を特定し、それを具体的なかつ定量的なシナリオとして提示することで、社会における変化を誘導することを目的に、2020 年度より開始した、経済産業省からの委託事業「技術革新によるエネルギー需要変化に関するモデル比較国際連携事業」、通称 EDITS (Energy Demand changes Induced by Technological and Social innovations)事業について紹介する。

2. 各種部門での低エネルギー需要社会実現の可能性

部門別に低エネルギー需要社会実現の可能性について考えてみたい。

2.1. 家電

家電の変化が見られている。図 2 は、様々な家電機器

がスマートフォンの機能で代替できるようになってきていることを示している。また、家電機器の電力消費量に対して、スマートフォンではかなり小さい電力消費量で済むようになっている。更に重要な点は、製品に「体化されたエネルギー(embodied energy)」である。製品の製造段階において投入されるエネルギーも、スマートフォンに代替されることで大きく低減される。無論、すべての機能が完全に代替されるわけではないが、別の便益(移動が容易であることなど)が付加されることで、代替が促進され、結果として、エネルギー消費そして CO₂ 排出量が低減される。

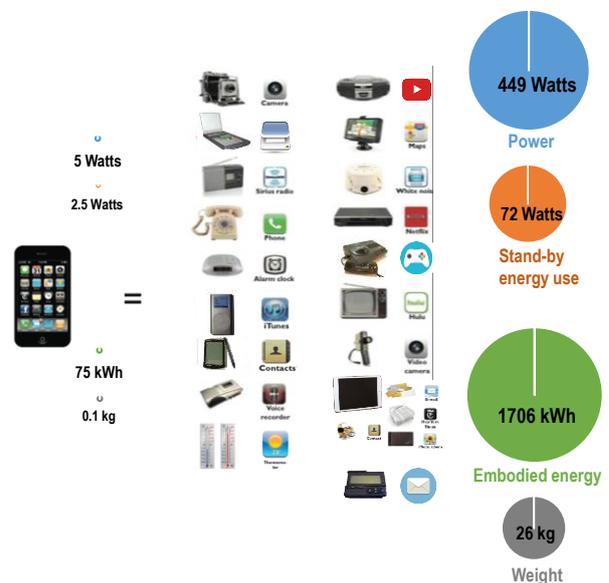


図2 家電機器の代替と低エネルギー化の可能性⁸⁾

2.2. 紙媒体

紙は情報を伝える手段として大きな役割を果たしてきた。一方、紙・パルプは、その製造工程で大きなエネルギー投入が必要なエネルギー多消費産業である。図3に印刷・情報用紙の消費量の変遷を示すが、近年、先進国のみならず途上国においても、一人当たり消費量の低下傾向が見られている。また、新聞巻取紙の消費量についても同様の傾向が見られている。IoT の進展により、様々なデジタルデバイスを用いて情報を比較的容易に得ることができるようになり、紙媒体の消費が低下してきているものと考えられる。デジタルデバイス普及当初は、紙媒体での印刷の低減はほとんど見られなかったが、

デバイスの進展やユーザーの慣れなどが相まって効果が表れてきたように見受けられる。

ただし、ダンボール紙の消費量は、宅配などの増加により、引き続き、上昇傾向が見られている。

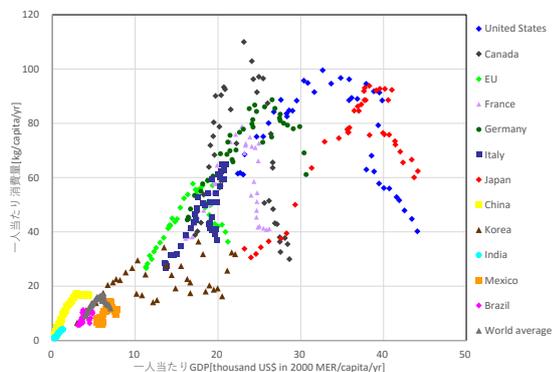


図 3 印刷・情報用紙の消費量の変遷⁹⁾

2.3. アパレル

アパレルは、製造から廃棄に至るまでのエネルギー消費量やライフサイクルの短さなどから、環境負荷が高いとの指摘がなされている。例えば文献 10)では、地球環境に対してファッション産業は世界の CO₂ 排出量の 8-10%(年間 40~50 億 t)を占めているとしている。

また文献 11)によると、ヨーロッパの家庭における衣料品の使用(洗濯、乾燥、アイロンなど)に伴う CO₂ 排出は年間 5.3 億 t と概算されている。衣料品の使用方法や同じ衣服を何回着るのかという維持管理は消費者個人の選択に依存するため概算しかできないが、平均的な T シャツの使用段階における CO₂ 排出量は、ライフサイクルにおける排出量の半分を占めているとされる。例えば、綿の T シャツのライフサイクル排出量を試算すると、50 回洗濯した場合、CO₂ 排出量の 35%は繊維生産に起因し、52%は使用段階で発生するとされる。なお、天然繊維は石油原料の合成繊維に比べて生地生産段階における CO₂ 排出量は少ないが、天然繊維は合成繊維に比べて洗濯、乾燥、アイロンがけに必要なエネルギーが大きいため、生産時の低カーボンフットプリントは、使用段階で相殺される可能性もある。

近年、アパレルの売り上げは飛躍的に伸びており、その背景にあるのがファストファッションの台頭である。フ

アストファッションとは、1990 年代後半から 2000 年代前半にかけて登場した衣料販売チェーンの業態のことを差し、その特徴は短いサイクルで流行のデザインを追いながら衣料品を大量生産し、低価格で販売することによって消費者に大量消費を促すというものである。服の 50%は着られることなく、廃棄されているとされているし、多くの服は稼働率が低く、クローゼットで出番を待っている。

ファッション業界も環境や社会に配慮した製品の推進も行ってきているところである。e コマースでの販売によって、ブランド企業は実店舗を維持することによるエネルギー消費や在庫を抱える必要がない。しかし、上述したように試着をせずに e コマースを通して衣服を購入してしまうと、サイズが合わなかったり、イメージが違っていたりするため、未使用で捨てられる服を増やしてしまうという側面がある。そのような問題を解決する方法としてバーチャル・フィッティングや体型を自動的に計測する技術などが開発されている。

更に、インターネットオークションの進展による中古服等の取引は、事実上の服のシェアリングの進展にあたるものであり、需給のマッチングを促し、アパレル製品の稼働率の向上、廃棄の低減となる。

アパレルについてのより詳細は、文献 12)を参照されたい。

2.4. 食料

農水産物生産から、食品加工、輸送、調理等を含む食料システム全体で排出される GHG は世界総排出の 21-37%¹³⁾とされる(これら推計は一般にフロー財を対象としているが店舗や施設等ストック財も含めると一層大きくなると見込まれる)。一方、人の消費のために生産された食品の約 1/3 はロス・廃棄されている。その原因は地域によって異なるが、中・高所得国では販売機会損失を避けるための過剰生産や消費段階での廃棄が多いとされる¹⁴⁾。近年進展が著しい ICT(情報通信技術)を活用し、食料需要をより正確に予測等できれば、食品ロス・廃棄が減ると同時に、プラスチック容器の低減、スーパーのスペース低減、冷蔵・冷凍エネルギー、輸送エネ

ルギーの低減などに波及し、エネルギー消費・GHG 排出の低減につながる可能性がある。また、SDGs の同時達成にも寄与し得る。

日本について産業連関表を利用した分析¹⁵⁾によると、高度需要予測技術や規格外品の個別販売等により、青果農業、食品業、家庭部門で発生している廃棄を 50% 低減できたとした場合、日本の総エネルギー消費は▲0.08～▲0.04EJ/年(日本の一次エネルギー供給の 0.4～0.2%に相当)、GHG 総排出は▲8.4～▲5.9 百万 tCO₂eq/年(日本の GHG 総排出の 0.6～0.5%に相当)変化すると推計している。日本の場合、食品廃棄率が小さいため、必ずしも大きな低減量の推計とはなっていないが、廃棄率がより大きいとされる海外も含め世界全体で取り組んだ場合には、より大きな低減効果があると考えられる。世界全体の試算では、各種想定した食品ロス・廃棄低減策によって、世界で 11 億 tCO₂eq/yr 程度の排出削減が見込まれる¹⁶⁾。ただし、食料システムの地域多様性は非常に高く、食品ロス・廃棄の低減効果等推計の不確実性があるため、引き続き精査・研究が必要と考えている。

2.5. 移動:カーシェアリング・ライドシェアリング

デジタル化の進展は、モビリティに大きな影響を及ぼす可能性がある。Connected; Autonomous; Service & Shared; Electric (CASE)と呼ばれる変化が起こっている。自家用車の稼働率は 4～5%程度と推計され、多くの時間は、自家用車は活用されていない。それは、高い費用を払っても、いつでもすぐにプライベート空間で移動が可能という利便性の高さのためである。しかし、完全自動運転車が実現すれば、ライドシェアリング、カーシェアリングとなっても、利便性を大きくは損なわず、また、稼働率の上昇によって、より安価な費用で利用可能となり得る。そのため、一部の趣向的な車などは除いて、ライドシェアリング、カーシェアリングが急激に進む可能性がある。そして、ライドシェアリングは直接的に自動車のエネルギー消費を低減し、カーシェアリングは自動車の台数を減らし、鉄やプラスチックなどの素材の利用を低減するとともに、その製造において必

要なエネルギー消費を低下し得る。RITE でも統合評価モデルを用いた定量的な試算を実施している¹⁷⁾。

OECD/ITF は、実際のデータ(人口分布、道路・公共交通ネットワーク、平日のトリップ需要(時間帯、OD (Origin-Destination)),トリップ選好等)に基づいてモデルを構築し、分析を行っている¹⁸⁾。アイルランドのダブリンにおいて、全ての自家用車をシェアカーに置き換えた場合はその 2%弱の車両台数で現在のモビリティを供給できるとしている。また、自家用車の 20%を置換した場合は(EV 無しでも)CO₂排出量が 22%低減されるとしている。

2.6. 産業:3D プリンティング

3D プリンター(アディティブ・マニュファクチャリング: AM)が進展してきている。金型を作ったの成形や切削による造形などに比べ、複雑な形状を作成でき、同じ強度でも軽い製品を作成できる場合が多くあり、マテリアル効率の向上にもつながり得る。また、大量生産ではなく、それぞれのニーズに合わせた製品製造が可能で、大量生産、大量廃棄を避けることができる可能性もある。

2.7. 行動変容

技術だけではなく、個々人の行動変容とそれに伴う社会変化も重要である。一方、行動変容だけに期待しても、大きな効果は得られにくい。技術と社会の意識の変化が相乗効果を持つことが、大きな社会変化につながるはずである。エシカル消費のような動きが、企業の行動変化も促し、社会全体での対応につながる。

例えば、若年層の運転免許証取得率が低下してきている。それは、自家用車の購入を減らす要因にもつながってくるため、企業における完全自動運転車開発の動機づけにもなってくるだろう。

2.8. リバウンド効果

一方でリバウンド効果としてのエネルギー需要増大の可能性もある。

文献 19)によれば、世界のデータセンターの電力消費量は 2010 年に 194 TWh であり、2018 年には 205

TWh(世界全体の電力消費量の約 1%)に増加したと推計されている。同時期の計算インスタンスは+550%になったのに対し、電力消費量は+6%に留まっているとされる。エネルギー効率向上の主な要因は、サーバー効率化、仮想サーバー化、ストレージドライブ効率化・高密度化、データセンターインフラの効率化、サーバータイプの変化である。一方で、ムーアの法則の終焉の可能性もあり、今後、データセンターの電力消費量の大幅な増大を推計している研究もある(文献 20)など。

リバウンド効果は、IoT による直接的な電力消費量の増大にとどまらない。例えば、完全自動運転車により、利便性が増せば電車やバスからの乗り換えが起こり、新たな移動需要そのものを誘発する可能性もある。更にマクロ的な視点からは、仮に特定の分野で消費が減っても、その分、別の消費に向かって、そこでエネルギー消費やCO₂排出が増えるというリバウンド効果も考えられる。研究として包括的な分析が必要であるとともに、実社会としての包括的な政策も必要と考えられる。

3. EDITS プロジェクトの概要

このような背景、問題意識の下で、RITE では、2020 年度より経済産業省の委託事業として EDITS 事業を開始した。

3.1. EDITS の目的

2019 年6月の G20 軽井沢アクションプランにおいて、「我々は、将来のエネルギー需給のより良い理解に関する定量分析の重要性、並びに、デジタル化、人工知能(AI)、インターネットオブシングス(IoT)及びシェアリングエコノミーによって牽引される需給両面のイノベーションの役割を認識する。我々は、世界の科学コミュニティ及び国際機関・枠組によってなされる、エネルギー・気候モデルのための経済全般にわたる全範囲シナリオのさらなる洗練及び開発のための努力を支持する。」とされた。

EDITS 事業では、大きく以下の 3 点を目的としている。

1) エネルギー需要サイドに焦点を置いた、国際的な研究コミュニティの構築を行う。エネルギー需要サイド

に関する、最新のデータやコンセプト、方法論、政策分析の共有を行う。それらを通して研究と政策分析の議論を深め、相互充実化を促進する。

- 2) 方法論やモデルの国際比較を通して、環境や気候政策分析に関する最先端の需要モデルを進展させる。また、学問分野横断的、エネルギー分野横断的、環境の領域横断的に、コンセプトと方法論を進展させ、また、それを広く国際的に展開する。
- 3) 構造化されたモデル実験とシミュレーションを通して、より良い政策提言を行う。特にデジタル化、シェアリングエコノミー、SDGs と気候目標との統合に相乗効果を有する政策立案のような、新しい分野やサービス供給を扱うモデルを構築、活用し、需要サイドの政策の潜在的インパクトや障壁、そして他 SDGs 目標とのシナジーおよびトレードオフを含めた評価を行う。

3.2. EDITS の研究体制

2 節で紹介したような内容を包含して、研究を深堀していくため、以下のようなテーマを設定し、それに対応した作業部会を設けて研究を実施している。また、各テーマの統合も行っていく予定である。研究全体のコーディネーションは、国際応用システム分析研究所(IIASA)の協力を得て実施している。

【部門別モデル化・分析・検討】

■ 産業部門

[主な課題] 産業部門モデル間の比較(理論、地理的/時間的/生物物理学的カバレッジ、データの利用可能性、手法等における相違の把握)、マテリアル効率性の効果等

■ 建築(民生)部門

[主な課題] 建築部門モデル間の比較(地域差、異質性)、シェアリングエコノミーの効果及びスマートワーキングが商業建築部門に与える影響 等

■ 運輸部門

[主な課題] 運輸部門モデルの比較(活動タイプ(旅客/貨物)、ロケーション(都市型/非都市型)、車両サイズ、モードの相違 等)

【データ収集・整理】

【主な課題】 需要側のマイクロデータ収集及び共有

【部門別モデル化・分析・検討】

■ 定性的シナリオ検討・策定

【主な課題】 1.5°C目標及び SDGs 目標に沿った低エネルギー・マテリアル需要に関する定性的シナリオ構築

■ モデル分析比較の Protokol 策定

【主な課題】 モデル間の比較分析の実施(各モデルの特徴を活かしたモデル分析比較)

■ 部門の統合分析

【主な課題】 定性的シナリオに沿った評価フレームワークの開発(厚生及び実行可能性評価) 等

部門横断的なテーマとしては、特に、デジタル化、公平性、ライフスタイル・行動変容、ビジネスモデル、理論構築に焦点を当てている。



図4 EDITS ロゴマーク(下段は、左から産業、建築、運輸、データ、定性的シナリオの作業部会)

エネルギー需要側は様々な部門にまたがっており、また国によっても多様である。そのため、上記のテーマを遂行するにあたって、表1に示すように多くの国・地域から多くの専門分野の研究者の参画を得て、EDITS 事業を推進しているところである。また、表1に記載以外でも、幅広い参加、協力を得ているところである。

4. おわりに

CN 実現への道のりは険しい。様々な方策を総動員する必要はある。デジタル化に誘因された、エネルギー需要側の様々な対策は、普及の障壁となっている「隠れた費用」を小さくできるようになることで誘発され得るも

のである。幅広いデジタル化の進展は、若い世代の意識変化も伴って、正に「環境と経済の好循環」を生み出す可能性を有している。また、気候変動対策のみならず、様々な SDGs の解決にも資する可能性がある。

表1 EDITS 参加研究機関

参加研究機関	実施内容
International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA)	RITE とともに、プロジェクト全体のコーディネーション、国際モデル比較の共有シナリオの策定、関連情報の収集 等
OECD/ITF	輸送部門関連情報の収集、分析
Stanford University	国際モデル比較の共有シナリオの策定支援
東京大学 未来ビジョン研究センター	国際モデル比較の共有シナリオの策定、参加関係機関・研究者との調整
Lawrence Berkeley National Labs (LBNL)	エネルギー需要技術等の各種データ収集・提供
Utrecht University	エネルギー需要技術等の各種データ収集・提供
Euro-Mediterranean Center on Climate Change (CMCC)	デジタル化技術のエネルギーへの影響評価、関連情報の収集、国際モデルによる分析試算
清華大学	中国のモデル改良および分析、関連のエネルギー需要技術等の各種データ収集・提供
UFRJ/COPPETEC	ブラジル及び南米のモデル改良および分析、関連のエネルギー需要技術等の各種データ収集・提供
Asian Institute of Technology (AIT)	インド、南アジア、東南アジアのモデル改良および分析、関連のエネルギー需要技術等の各種データ収集・提供
大阪大学	日本の民生部門モデル分析
University of Wisconsin	アメリカ関連データ収集、分析支援、デジタル化技術の影響評価
University of California, Santa Barbara (UCSB)	アメリカ関連データ収集、分析支援
The Korean Society of Climate Change Research	韓国関連のモデル改良および分析、関連のエネルギー需要技術等の各種データ収集・提供
Central European University	欧州の民生部門モデル分析
University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna (BOKU)	産業セクターモデル分析
University of Freiburg	産業セクター等のモデル分析
ISCTE - University Institute of Lisbon	テクノロジー、産業、政策など分野横断的分析
Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change (MCC)	ドイツのモデル改良および分析、関連のエネルギー需要技術等の各種データ収集・提供
University of East Anglia (UEA)	欧州等でのライフスタイルの変化に伴う分析
University of Groningen	環境行動と状況的要因がエネルギー技術と受容性に与える影響分析

EDITS 事業では、次期 IPCC 報告書への貢献や、各国政府や企業などのエネルギー需要側対策の推進につながる研究成果を提供していく。EDITS で主たる対象と考えているエネルギー需要側対策は、直接的にエネルギーや CO₂ を削減するよりも、デジタル化技術等の進展を通して、製品やサービスを変化、最適化することで間接的にエネルギー、CO₂ を削減するものである。よって、政府や社会も直接的な理解はしにくく、対応が遅れる可能性もある。そのため、本事業では、複雑なシステムをよく理解できる形にし、また定量的に見える形にして、政府、企業、社会に発信していきたい。

参考文献

- 1) IPCC, Special Report on 1.5 °C (2018)
- 2) A. Grübler et al. Nature Energy 3(6) (2018)
- 3) 秋元圭吾 他、エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス (2021)
- 4) J. Millward-Hopkins et al., Global Environmental Change (2020)
- 5) C. Wilson et al., Science 368(6486) (2020)
- 6) F. Creutzig et al., Nature Climate Change 8(4) (2018)
- 7) Global Energy Assessment (2012)
<https://iiasa.ac.at/web/home/research/Flagship-Projects/Global-Energy-Assessment/Home-GEA.en.html>
- 8) A. Grübler et al. (2021)
https://iiasa.ac.at/web/home/research/researchPrograms/TransitionstoNewTechnologies/LED_Greenpeace_Gruebler.pdf
- 9) FAO, FAOSTAT database (2021)
- 10) K. Niinimäki et al., Nature Reviews Earth & Environment 1 (2020)
- 11) G. Peters et al., International carbon flows: Clothing, Carbon Trust (2011)
- 12) 木谷佳楠 他、エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス (2022)
- 13) IPCC, Special Report on Climate Change and Land (2019)
- 14) FAO, Global food losses and food waste: extent, causes and prevention (2011)
- 15) 林礼美 他、エネルギー・資源 (2020)
- 16) 林礼美 他、エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス (2022)
- 17) K. Akimoto et al., Technological Forecasting and Social Change (2022)
- 18) OECD/ITF, Shared Mobility Simulations for Dublin (2018)
- 19) Masanet et al., Science 367(6481) (2020)
- 20) M. Koot & F. Wijnhoven, Applied Energy (2021)