

システム研究グループ

グループメンバー(2023 年 4 月)

グループリーダー・主席研究員	秋元 圭吾	主任研究員	中野 優子
副主席研究員	山田 航也	主任研究員	大西 尚子
主任研究員	和田 謙一	主任研究員	橋本 照子
主任研究員	長島 美由紀	研究員	榊田 仁次
主任研究員	本間 隆嗣	研究員	安藤 輝尚
主任研究員	佐野 史典	研究員	Jubair Sieed
主任研究員	山川 浩延	研究員	Dahyun Kang
主任研究員	林 礼美	研究助手	山本 清美
主任研究員	伏見 温子	研究助手	斎藤 美三子
主任研究員	望月 則孝 (企画調査グループ兼務)	研究助手	工藤 幸子
主任研究員	桑鶴 整	研究助手	南村 良子

システム研究グループの研究活動報告

システム研究グループは、システム的な思考、システム的な分析を通して、地球温暖化やエネルギー対応に関する有用なる情報提供を国内外に行っている。

本稿では、技術・社会イノベーションによる低エネルギー需要社会の実現を後押しするシナリオ策定等を実施してきている、国際モデル比較プロジェクト「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」(経済産業省からの委託事業)、通称 EDITS (Energy Demand changes Induced by Technological and Social innovations)事業の研究進捗について報告する。EDITS 事業については、FY2022 の RITE Today にも記載しており、必要に応じて参照されたい。

1. はじめに

2℃、1.5℃目標の実現に向けて、エネルギー供給サイドだけではなく、エネルギー需要サイド、そして低エネルギー需要社会実現に向けた社会変化を誘発していく必要がある。しかもそれは、単なる需要の低減ではなく、「経済と環境の好循環」をもたらすような、つまり、ウェルビーイング(wellbeing)は向上させつつ需要は低下させる社会の実現を志向する必要がある。RITE では、別途、ALPS (ALternative Pathways toward Sustainable development and climate

stabilization)事業において、モデル開発を実施しつつ、EDITS 事業の国際モデル比較事業でのシナリオプロトコルに沿い、また、他の研究機関シナリオと調和を図った形で、世界全体で、そしてエネルギー供給サイドと需要サイド、また需要側部門間でも整合性がとれている、定量的なシナリオ作成を行った。

1.1. エネルギー需要側対策の重要性とシナリオ動向

気候変動に関する政府間パネル(IPCC)は、2018 年に 1.5℃特別報告書(SR15)¹⁾を公表した。そこでは、1.5℃を実現する、様々な排出経路が示されたが、とりわけ、Low Energy Demand (LED)というシナリオ²⁾が注目をされた。これは、通常のモデル分析で示されるような、最終エネルギー需要よりもずっと小さなエネルギー消費の姿を示したものである。気候変動対策のみならず、持続可能な開発目標(SDGs)の同時達成にも寄与し得るとされる。文献 3)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いる。分散型の小規模技術は、近年のエネルギー自由化市場、技術革新、デジタル化によりこれら新技術の活用が広がっていることを指摘している。そして、IPCC 第 6 次評価報告書⁴⁾では、新たに需要サイドの対策に特化した章が設けられ現状における論文等のサーベイがなされ、そして、「需要側の対策とエンドユースサ

ービスの新しい提供方法によって、エンドユース部門における世界全体の GHG 排出量をベースラインシナリオに比べて 2050 年までに 40~70%削減しうる。」「需要側の緩和対応策は、全ての人々の基本的幸福の向上と整合的である。」(政策決定者向け要約 SPM, C.10)とされた。

図 1 には、温暖化対策の全体像を示す。従来、社会構造変化・ライフスタイル変化は、外生的なシナリオとして分析されることがほとんどであった。しかし、その場合、どのような対策によって、低エネルギー需要が達成されるのか不透明であった。また、ライフスタイル変化は、教育といった文脈で議論されることが大部分で、しかし、教育の重要性は理解できるものの、全世界的に大きな効果として表れるためには時間軸が長いことと、効果が不透明な点が課題で、分析的な研究が十分なされてきていない。本研究では、デジタル化技術などの技術変化がきっかけとなり、社会構造変化・ライフスタイル変化に結び付く可能性を定量的に分析していこうという点で新規性が高い。エネルギー需要側技術の進展により、ベースライン排出量自体が低位になるような変化がなければ、2050 年カーボンニュートラルや、大幅な排出削減の実現はとても難しいと考えられる。

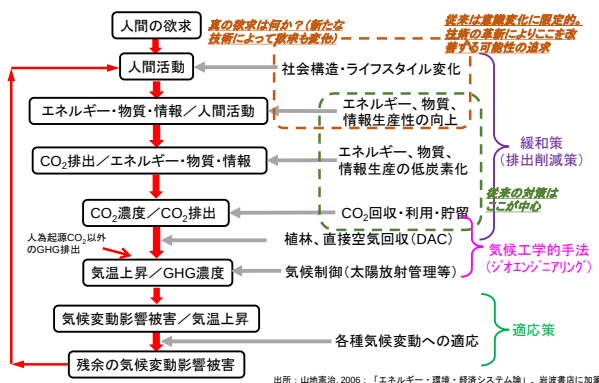


図1 地球温暖化対策の基本構造と社会構造・ライフスタイル変化の位置づけ

1.2. DX による低エネルギー需要等の実現可能性の評価例

デジタルトランスフォーメーション(DX)およびその他のイノベーションによって、暗黙的なコストを低減し、比

較的安価なコストによって、サーキュラー・シェアリングエコノミーを誘発できる余地が生まれてきている(文献5)など)。IPCC 第6次評価報告書(AR6)⁴⁾でも、文献5)を含め、各種文献からの各対策におけるエネルギー需要や CO₂ 排出量の低減効果に関する報告結果として、図2、図3のような整理もなされた。推計の幅が大きいものの、エネルギー需要や CO₂ 排出量のかなり大きな低減も期待されることが示されている。一方、これらの分析は、各対策の低減率に関する評価であり、部門横断的に整合的かつ定量的なエネルギー低減量や、CO₂ 排出低減量が示されているわけではない。また先述のように IPCC AR6 は、「需要側の対策とエンドユースサービスの新しい提供方法によって、エンドユース部門における世界全体の GHG 排出量をベースラインシナリオに比べて 2050 年までに 40~70%削減しうる。」とした。ただし、各対策をそれぞれ積み上げて評価したものであり、対策コストを含めて、必ずしも整合的かつ定量的なモデルを使って部門横断的に推計したものではない。

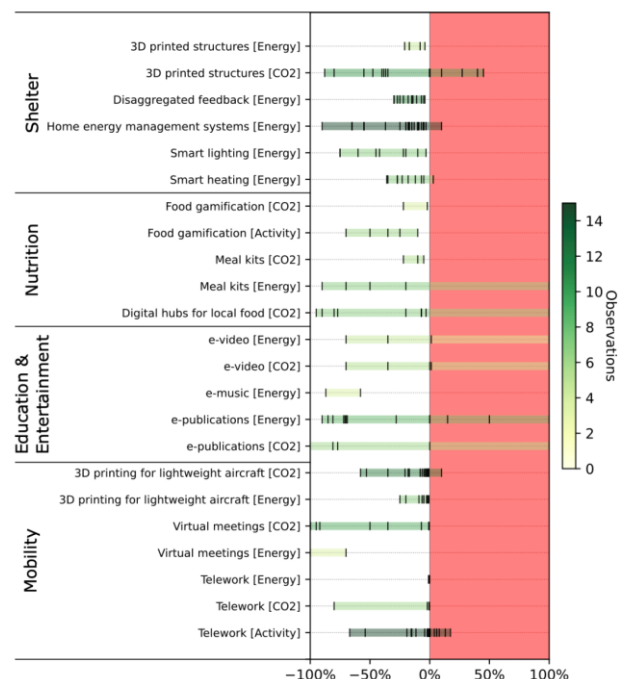


図2 デジタル化によるエネルギー消費・CO₂排出への影響(出典:文献4))

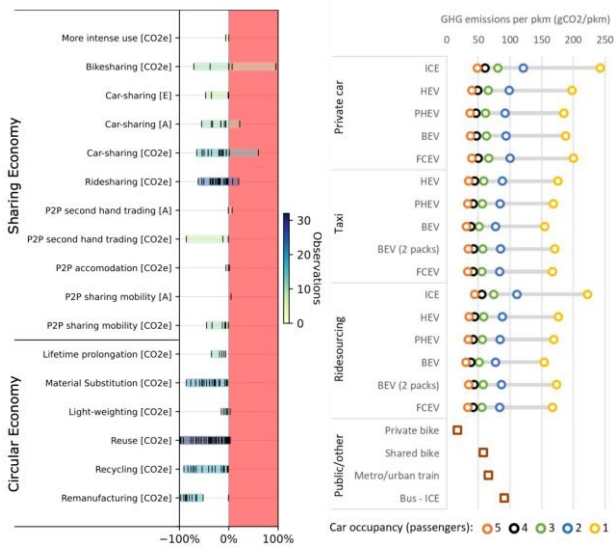


図3 シェアリング・サーキュラーエコノミーによるエネルギー消費・CO₂排出への影響(出典:文献4))

2. 分析シナリオの想定

複雑なシステムを包括的かつ定量的に分析し、その有用性と課題を明確にしていくことが、DXによって誘発される、サーキュラー・シェアリングエコノミー等の低エネルギー需要社会を社会全体として推進していく上での強力な推進力となると考えられる。EDITS事業で探索し定量的なシナリオとして提示を試みるのは、単なる需要の低減ではなく、「経済と環境の好循環」をもたらすような、つまり、ウェルビーイングは向上させつつ需要は低下させる社会の実現のシナリオである。

2.1. 定性的シナリオ

EDITS事業においては、ナラティブWGにおいて、図4のようなドライバーを考慮した定性的なシナリオ“high wellbeing with low resource use (High-with-Low)”シナリオが提示された⁶⁾。

デジタル化の進展と新結合によるイノベーション、そして適切な生活水準(DLS)が融合した世界観であり、wellbeingを高めながら、低需要(エネルギーおよび各種物質や製品等)を実現し得るとするシナリオである。要素間の関係性については、図5に示す。

これまでの統合評価モデル(IAM)分析では、最終エネルギー消費量を人口、GDPのシナリオから外生的に与

え、弾性値等を使って気候変動対策下での最終エネルギー消費量を推計するといった手法をとることが多い。しかし、産業などの需要はあくまで wellbeing を高める消費行動による結果としての需要である。エネルギー需要は、あくまで製品・サービスを得るための派生的需要である。製品・サービスを得る消費行動の変化に焦点を当て、結果としての素材製品やエネルギー需要の低減を推計し、その上で、全体としてのエネルギー需給、そして、結果としてのCO₂排出量を推計していく手法が新規性の高いところとなっている。それを通して、需要サイドの対策の効果の見える化を図り、「経済と環境の好循環」実現に向けた社会変化の誘因としていく。

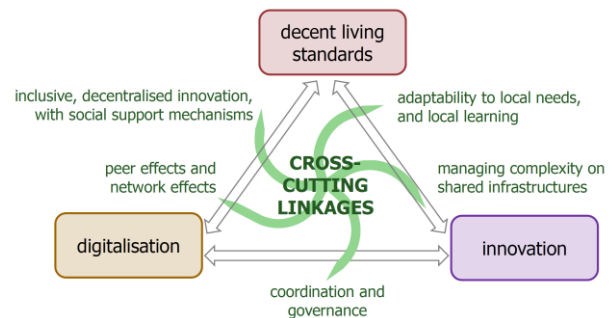


図4 定性的シナリオ'High-with-Low'の想定ドライバー(出典:文献6))

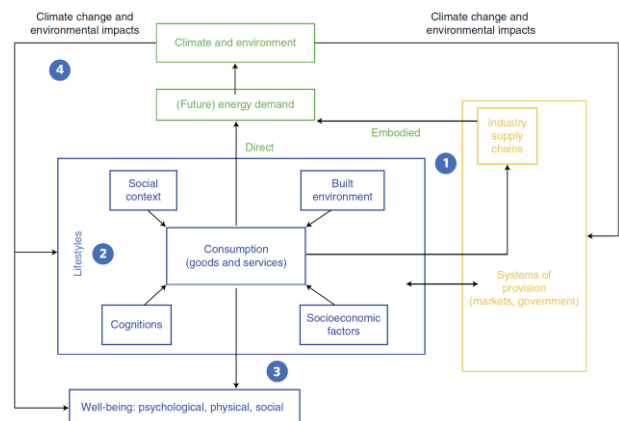


図5 定性的シナリオ'High-with-Low'の要素間の関係(出典:文献6))

2.2. 定量的シナリオ分析の想定

世界エネルギー・温暖化対策評価モデル DNE21+を用いて、DXを中心にして誘発されるサーキュラーエコノ

ミー、シェアリングエコノミーによる、低エネルギー需要社会の実現、そして、GHG 排出量の低減効果を定量的に推計した。推計には現時点では定量的なデータ入手の困難性もあり、波及効果について一部しか考慮できていないことに注意が必要である。また、モデル前提条件の想定についても、不確実性が大きく、より良いデータの入手、反映の課題が残っている。DNE21+モデルは、鉄鋼、セメント、化学製品など、CO₂ 排出原単位の高い製品を積み上げ評価しているため、サーキュラーエコノミー、シェアリングエコノミー等による基礎素材製品の低下、それに伴うエネルギー消費の低下等を整合的に分析可能である。

図4のような定性的なシナリオドライバーを基に、定量的なシナリオ想定を行った。表1に分析を行った、DX によるサーキュラーエコノミー(CE)誘発のシナリオ想定を示す(以降、本報告では、シェアリングエコノミーもサーキュラーエコノミーに内包されるものとして、CE と記載する)。また、表 2 には、分析を行ったシナリオ名と、各シナリオの想定内容を示す。排出シナリオとしては、特段の排出シナリオを想定しないベースライン(Baseline)と、2℃、>66%確率の B2DS シナリオを想定した。B2DS では、別途、日本を含む主要先進国それぞれについては 2050 年 GHG のカーボンニュートラルを想定した。

需要側のデジタル化の進展、イノベーションとして、CE 関連だけではなく、変動性再生可能エネルギーの利用増大に資する、電力需要側の柔軟性の提供の可能性についても考慮した。具体的には、DNE21+の電力需要曲線において、BEV や PHEV、ヒートポンプ給湯器、コジェネレーションシステムが、特に太陽光の日中の供給力の需要調整を、標準のシナリオよりも、柔軟に提供できると想定した("FL"シナリオ)。系統統合費用については、BEV、PHEV の逆潮流の発生によって、系統側での蓄電池低減を伴うことも想定し、系統統合費用の低減が可能と想定した。

また、需要側技術は、granular technologies と呼ばれるような規模の小さい技術が多い。これら技術は、サイクルが早いことがあって、一般に技術習熟率が高い傾向が観測される。DNE21+では、太陽光発電や風力発電、EV 用バッテリーなど、標準シナリオでも大きなコスト低減を見込んでいる。しかし、これら比較的規模の小さい技術の技術習熟率が一層高くなるシナリオ("GR"シナリオ)も想定した。ただし、このシナリオはあくまで外生的な想定であり、参考として他シナリオの結果と比較すべきものという位置づけであることに注意されたい。

表1 DX によるサーキュラーエコノミー(CE)誘発のシナリオ想定

DX による CE 誘発等	エネルギー消費への直接的な影響	エネルギー消費への間接的な影響	DNE21+モデル分析における想定(暫定試算)
1) 完全自動運転車等の実現により誘発されるライドシェア、カーシェアリング(2030年時点までは想定せず)	- ライドシェアによる乗用車用エネルギー消費量の低減	- カーシェアリングに伴う乗用車台数の低下に伴う、鉄鋼、プラスチック、ゴム、ガラス、コンクリート等の低減 - 製品、素材の国際貨物輸送の低減⇒項目8)	- 鉄鋼製品生産量:▲4%(車両+立体駐車場。道路建設含まず) - プラスチック製品:▲1% - タイヤ製品:▲28%(乗用車向け比)(エネルギー消費量低減換算値をモデルで想定) - ガラス製品:▲28%(乗用車向け比)(エネルギー消費量低減換算値をモデルで想定) - セメント製品:▲1%(立体駐車場のみ。道路建設含まず)
2) バーチャルミーティング、テレワーク	- 移動の低減に伴う運輸部門のエネルギー消費量の低減	- 長期的に建築物の稼働率上昇、必要な空間面積の低減により、鉄鋼、コンクリート等の低減の可能性有【今回のモデル分析では未考慮】	- 旅客需要:▲10%
3) E-publication等による紙の代替	- 紙の生産のためのエネルギー消費量の低減	- 紙媒体の配送等の貨物需要低減の可能性有【今回のモデル分析では未考慮】	- 紙パ生産量:▲20%
4) E-コマースや他のDXによるアパレルのリサイクル・シェア化の促進	- アパレル製造のエネルギー消費の低減	- ショッピングセンター等、小売店舗の低減と、それに伴うエネルギー消費、また建築物建設の低減により、鉄鋼、コンクリート等の低減の可能性有【今回のモデル分析では未考慮】	- アパレル生産量:▲20%(エネルギー消費量低減換算値をモデルで想定)
5) 都市開発、設計等の進展による建築物の高寿命化	- 建築物の高寿命化による、セメント、鉄鋼製品の低減に伴うエネルギー消費量の低減		- 建築物の高寿命化: +40%、それに伴うセメント:▲3%、鉄鋼製品需要の低減:▲3%
6) 需要予測の向上等による食品廃棄の低減	- 必要食品生産量の低減等に伴う、窒素肥料、プラスチック製品等の生産に伴うエネルギー消費量の低減 - 小売店舗等のエネルギー消費量の低減 - 必要食品生産量の低減等に伴う、メタン、一酸化窒素排出量の低減	- 農畜産物、食品等の低減に伴う国際貨物輸送の低減⇒項目8) - 食品販売量の低減に伴う、小売店舗の低減に伴う鉄鋼、コンクリート製品等の低減の可能性【今回のモデル分析では未考慮】 - 他用途への利用可能な土地面積の増大に伴う植林等によるCO ₂ 固定可能性【今回のモデル分析では未考慮】	- 石油化学製品(窒素肥料含む)の低減:▲1% - プラスチック製品:▲1% - 紙パ製品:▲0.5% - 輸送サービス需要:▲1% 他 (以上、産業連関表より算定) - メタン、一酸化窒素排出低減:▲493 MtCO ₂ eq/yr in 2050
7) 3D プリンティングの適用による素材の低減	- アルミニウム、鉄鋼製品等の低減 - 製造段階による電力消費量の低減	- 航空機の軽量化に伴う運航時のエネルギー消費量の低減 - 自動車等の軽量化に伴うエネルギー消費量の低減【今回のモデル分析では未考慮】	- アルミニウム製品:▲1% - 鉄鋼製品:▲0.02% - 直接的電力消費量:▲1% - 航空機の運航時のエネルギー消費量:▲10%
8) 基礎素材やその他製品需要の低減に伴う国際海運需要の低減	- 国際海運需要の低減によるエネルギー消費量の低減	-	- 国際海運需要:▲1%

赤字: 家庭部門関連、緑字: 業務部門関連、青字: 輸送部門関連、紫色: 産業部門関連、茶字: 非 CO₂ GHG 等

表2 DXによるサーキュラーエコノミー(CE)誘発のシナリオ想定

	排出削減経路	主にデジタル化によるエネルギー需要低減						電力需要の フレキシビリティ(EV, HP, CGS)	小規模技術(PV、 風力、EV等)の より急速なコスト 低減
		運輸 1)	家庭 2, 3, 4)	建築物 5)	農業・ 食品 6)	産業 7)	派生 効果 8)		
BL-Std	Baseline (特段の気 候変動緩和 政策を想定 せず。炭素 価格0)	—	—	—	—	—	—	—	—
BL-Mobil		○							
BL-Resid			○						
BL-Build				○					
BL-Food					○				
BL-Ind						○			
BL-All_CE		○	○	○	○	○	○		
BL-All_CE+FL		○	○	○	○	○	○	○	
BL-All_CE+FL+GR		○	○	○	○	○	○	○	○
B2DS-Std	B2DS 2℃を十分 に下回る排 出に抑制 (かつ2030 年の各国 NDCsを想 定、主要先 進国:2050 年GHGでの CN)	—	—	—	—	—	—	—	—
B2DS-Mobil		○							
B2DS-Resid			○						
B2DS-Build				○					
B2DS-Food					○				
B2DS-Ind						○			
B2DS-All_CE		○	○	○	○	○	○		
B2DS-All_CE+FL		○	○	○	○	○	○	○	
B2DS-All_CE+FL+GR		○	○	○	○	○	○	○	○

注1) 今回の分析では、IPCC等で用いられている共有社会経済パス(SSP)は、中位的なSSP2ベースで分析

注2) 本来、DXによる電力消費量の増大等のリバウンド効果も考えられるが、CO2限界削減費用低下に伴うリバウンド効果以外のリバウンド効果は今回考慮していない

3. シナリオ分析結果

まず、特段の気候変動緩和政策を想定しない、Baseline シナリオの結果を示す。図 6、図 7 に、CE 進展を想定しない標準シナリオ(Std)からの世界の最終エネルギー消費量の低減と、GHG 排出量の低減をそれぞれ示す。かなり限定された波及効果のみを考慮した分析段階ではあるものの、想定した CE 実現によって部門横断的に大きな省エネ効果が期待できることが示されている。また、GHG の排出低減効果も大きいことが推計される。完全自動運転車等の実現によって誘発されるカーシェアリング、ライドシェアによる低エネルギー需要への寄与は、今回想定した DX の効果としては、産業部門への波及を含めて大きい、それ以外にもバーチャルミーティングなどの効果等も大きい効果があることを示している。食品ロスの低減は、特に非 CO₂ GHG の削減を大きく促す可能性を示している。

同じく、B2DS シナリオについて、図 8、図 9 に、CE

進展を想定しない標準シナリオ(Std)からの世界の最終エネルギー消費量の低減と、GHG 排出量の低減をそれぞれ示す。かなり限定された CE の事例および波及効果のみを考慮しただけでも、2050 年では、現在の世界の最終エネルギー消費量全体の 6%程度、また、2℃目標下で経済合理的と推計される省エネ量の半分程度もの省エネが、CE によって更に追加できる可能性が示唆される。排出削減目標が決まっている条件では、想定した CE 対策は相対的に費用が安価なため、限界的な費用の対策と評価される、CCS 付きバイオエネルギー(BECCS)や大気中 CO₂ 直接回収貯留(DACCS)といった二酸化炭素除去(CDR)技術への寄与を低減し得る。なお、最終エネルギー消費量の低減効果は大きい、CO₂ 削減効果は、エネルギー供給側の CO₂ 原単位低減も伴っているため、エネルギー消費量ほど、大きくは算定されない。ただし、後述のように、費用低減効果は大きい。

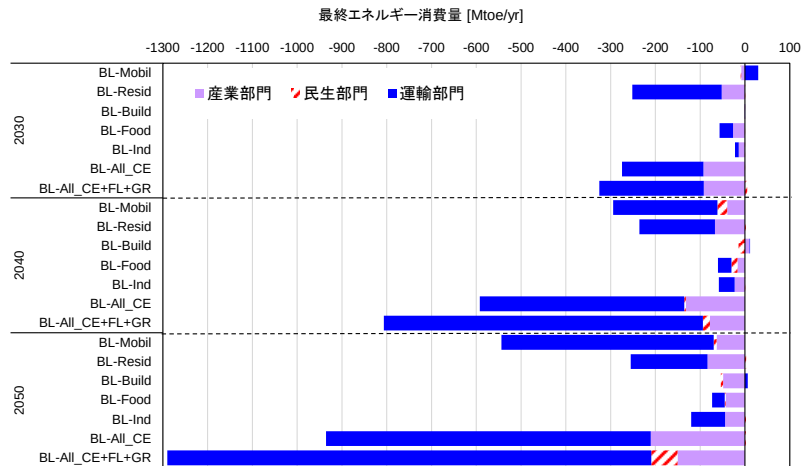


図6 世界エネルギー消費量(ベースラインシナリオ、CE 想定時の変化)

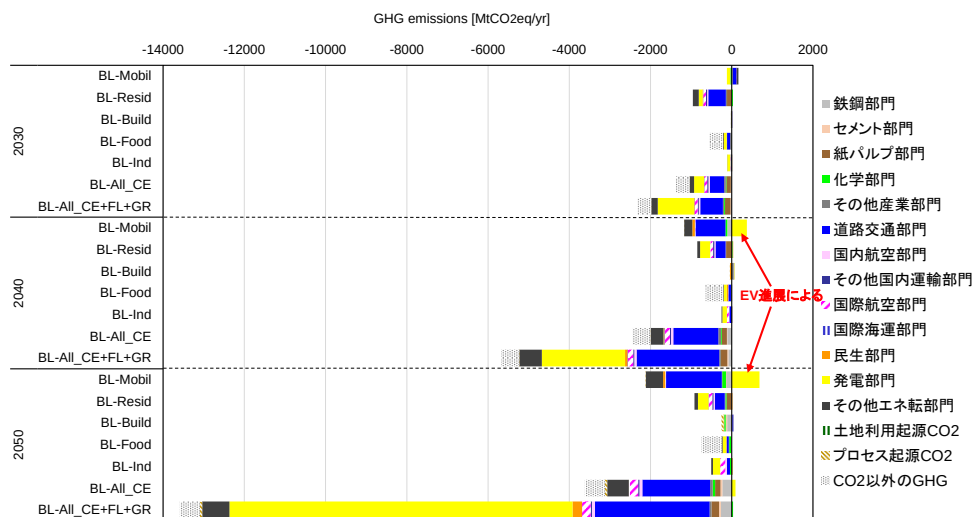
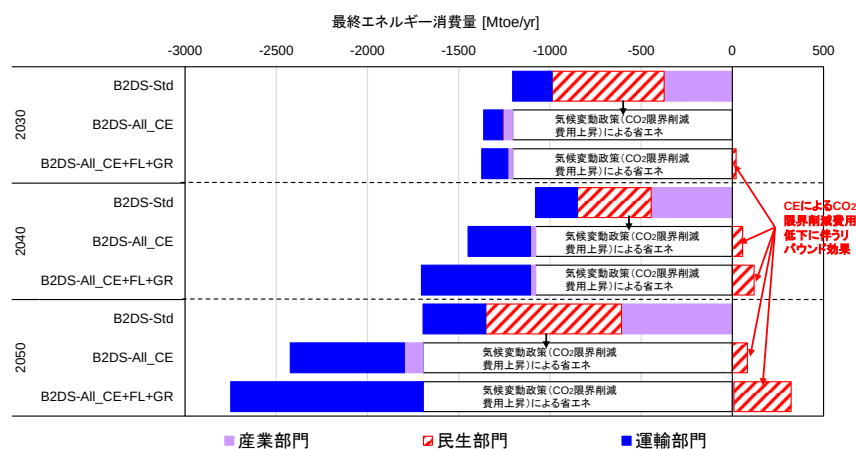


図7 世界の GHG 削減効果(ベースラインシナリオ、CE 想定時の変化)



参考) 2019年の世界の最終エネルギー消費量実績値: 10 Gtoe/yr、2050年のベースラインの最終エネルギー消費量推計値: 14 Gtoe/yr

図8 世界エネルギー消費量(B2DS シナリオ、CE 想定時の変化)

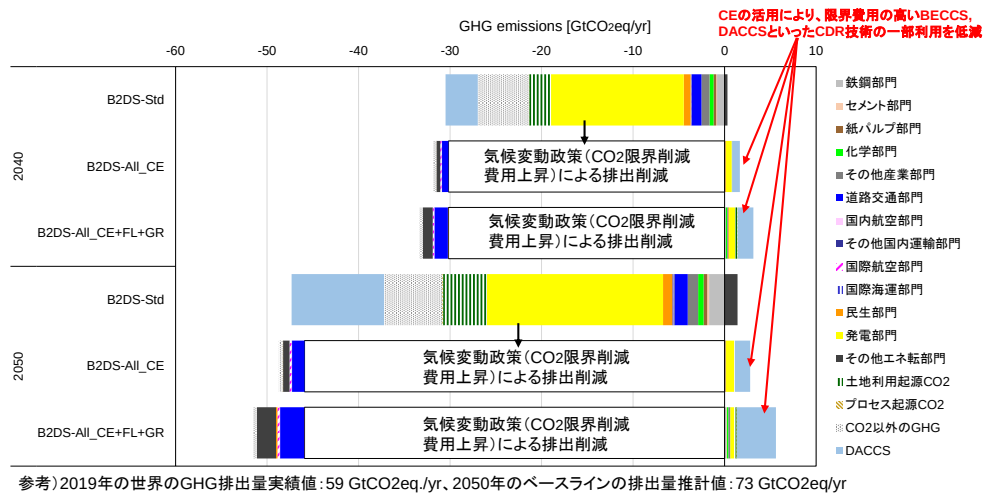


図9 世界の GHG 削減効果(B2DS シナリオ、CE 想定時の変化)

図 10 には、世界地域別の一人当たり最終エネルギー消費量を示す。先進国では、特に需要側で必要以上に多くのエネルギーが消費されており、'High-with-Low' シナリオは、主に先進国の低エネルギー需要の実現を誘発し、一人当たりエネルギー消費の国際的な格差を縮小させる。

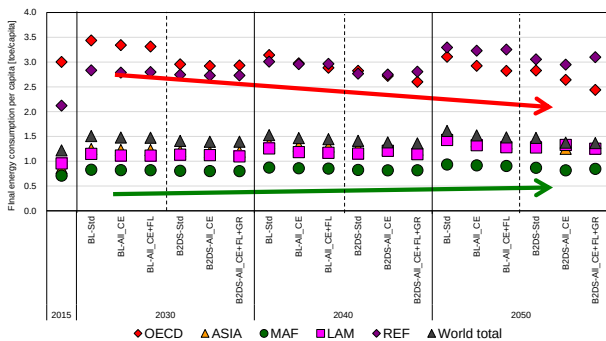


図 10 世界地域別の一人当たり最終エネルギー消費量

表 3 には、CE シナリオ下におけるエネルギーシステム総コストの Std シナリオ比での低減を、また、表 4 には、B2DS 時の CO₂ 限界削減費用を示す。DX に誘因された CE の推進により、エネルギーシステムコストの大きな低下が推計される。特に完全自動運転車等によるライドシェア、カーシェアによって社会全体としての大きなコスト低減効果が期待できるが、テレワークなどの家庭部門の変化、食品ロス低減なども、エネルギーシステムコストの低減に比較的大きな効果が期待できる。

また、表 4 で確認できるように、2℃目標等の長期目標の実現においては、CO₂ 限界削減費用の低下(2～3割程度)が期待できる。

表 3 エネルギーシステム総コストの低減:CE 想定時(単位:Billion USD/yr)

	Scenarios	Mobil	Resid	Build	Food	Ind	All CE	All CE +FL	All CE +FL+GR
2030-2040 年の 間の年平均値	Baseline	▲547	▲339	▲1	▲57	▲4	▲894	▲894	▲963
	B2DS	▲556	▲352	▲0	▲64	▲5	▲926	▲928	▲1038
2040-2050 年の 間の年平均値	Baseline	▲1601	▲459	▲1	▲74	▲7	▲1971	▲1971	▲2085
	B2DS	▲1635	▲477	▲6	▲90	▲14	▲2037	▲2038	▲2266

※ Baseline、B2DS のそれぞれの排出シナリオの標準ケースからの CE ケースによるコスト低減分

表 4 B2DS 時の CO₂ 限界削減費用(単位:USD/tCO₂eq)

	B2DS-Std	B2DS All-CE	B2DS All-CE+FL	B2DS All-CE+FL+GR
2040 年	68-310	57-238	57-240	50-195
2050 年	146-739	123-524	122-522	60-364

※ 費用の幅は国による差異(主要先進国に別途 2050 年 CN 制約を想定していることによる)

4. まとめ

本年度は、ナラティブグループが提示した定性的なシナリオ“high wellbeing with low resource use (High-with-Low)”のコンセプトに沿って、地域・国、部門横断で整合的かつ定量的なシナリオとして世界エネルギー・温暖化対策評価モデル DNE21+において、モデル化を行い、一次試算を行った。本年度の分析では、定量的な推計の困難さから、一部の DX によって誘発され得る CE についてのみ、モデル化して分析・評価を行った。また、その波及効果についても定量的な推計の困難さから、限定的な波及効果のみ考慮した。それに関わらず、相応のエネルギー低減効果、GHG 排出削減効果が推計された。また、エネルギーシステムコストの低減や、B2DS シナリオ(2℃未満、>66%確率)では CO₂ 限界削減費用の低下が推計された。これは、まさに「経済と環境の好循環」もしくは「high wellbeing with low resource use」の可能性を示すシナリオと言える。

しかしながら、IPCC SR1.5 で取り上げられた Low Energy Demand (LED)シナリオにおける最終エネルギー消費量の推計は、本分析の推計値を大きく下回るものであり、引き続き、様々な DX によって誘発され得る各種対策、更に派生的に誘発され得る CE 等の社会変

化を定量的にモデル化し、定量的なシナリオ評価を実施していく必要がある。一方で LED シナリオとギャップが生じる理由の理解を深めていくことも重要と考えられる。定量的かつ包括的な分析を一層進めること、他方でそれでもなおギャップが存在するのであれば、そのギャップの理解を深めることが、次期 IPCC 報告書等の評価等で重要になると考えられる。また、エネルギー低減側の評価だけではなく、リバウンド効果も含めた分析も進め、より一層の包括的な評価を行っていくことが重要である。

参考文献

- 1) IPCC Special Report on Global Warming of 1.5°C (2018)
- 2) A. Grubler et al., A low energy demand scenario for meeting the 1.5°C target and sustainable development goals without negative emission technologies. Nat. Energy, 3(6), 515-527 (2018)
- 3) C. Wilson et al., Granular technologies to accelerate decarbonization. Science, 368(6486), 36-39 (2020)

- 4) IPCC WG3 AR6: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change (2022)
- 5) C. Wilson, L. Kerr, F. Sprei, E. Vrain, M. Wilson, Potential Climate Benefits of Digital Consumer Innovations. Annu. Rev. Environ. Resour., 45(1) (2020)
- 6) EDITS WG3 Narratives group (Arnulf Grubler, Greg Nemet, Shonali Pachauri, Charlie Wilson), The 'High-with-Low' Scenario Narrative (2022)