

## システム研究グループ

### グループメンバー(2020年12月末)

グループリーダー・主席研究員	秋元 圭吾	主任研究員	林 礼美
主席研究員	友田 利正	主任研究員	伏見 温子
副主席研究員	山田 航也	研究員	中野 優子
主任研究員	和田 謙一	研究員	大西 尚子
主任研究員	長島 美由紀	研究員	樹田 仁次
主任研究員	本間 隆嗣	研究助手	山本 清美
主任研究員	佐野 史典	研究助手	斎藤 美三子
主任研究員	小田 潤一郎	研究助手	北村 喜代美
主任研究員	山川 浩延	研究助手	工藤 幸子
主任研究員	金星 春夫 (企画調査グループ兼務)		

## 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、脱炭素化に向けた対応戦略について、システム的な分析等の研究成果を紹介する。

### 1. カーボンニュートラル実現に向けたCCUの役割

本号 RITE Today のビヨンド EXPO 記事において、カーボンニュートラル実現の対策の方向性について記載するとともに、負排出を実現する、大気中 CO<sub>2</sub> 直接回収・貯留(DACCS)の役割について紹介した。ここでは、カーボンニュートラル実現における CO<sub>2</sub> 回収・利用(CCU)の役割について、世界エネルギー・温暖化対策評価モデル DNE21+による分析を含め紹介する。

#### 1.1. CCUの概要と留意点

CCU には、石油増進回収(CO<sub>2</sub> を地中に圧入し石油を増進回収する)など CO<sub>2</sub> 地中貯留の1つとしての CO<sub>2</sub> 利用の他、燃料利用、化学品利用、鉱物化の促進などがある。なお、CO<sub>2</sub> は、エネルギー準位が低く安定的である。エネルギーや化学品利用する場合には、水素等の合成によってエネルギーを追加する必要がある。一方、セメントにおける鉱物化の促進などにおいては、その反応において水素等のエネルギー投入は不要である。

例えば、燃料利用の場合は、その効果について注意が

必要である。合成に用いた CO<sub>2</sub> は燃焼時に再び放出されるため、CO<sub>2</sub> の回収には排出削減効果はない。CO<sub>2</sub> はあくまで水素の利便性を高めるため、水素輸送を媒介する役割となる。あくまでカーボンフリー水素エネルギーによる、化石エネルギーの代替効果によって、CO<sub>2</sub> が削減されることとなる。ただ、その代替効果の CO<sub>2</sub> 排出削減効果は、合成に利用された CO<sub>2</sub> 量と同値となる。

また、合成燃料に用いる CO<sub>2</sub> は、どこから回収された CO<sub>2</sub> であっても原理的には差異がなく、化石燃料燃焼に伴って排出される CO<sub>2</sub> を回収して利用しても差異はない。ただし、化石燃料燃焼 CO<sub>2</sub> 回収の場合は、別途、化石燃料燃焼は行われるため、グロスでの排出ゼロは実現できない。そして、ネットでゼロ排出を実現するには、その化石燃料燃焼による CO<sub>2</sub> 排出をキャンセルするために、別途、負排出技術(NETs)が世界のどこかで行われる必要がある。よって、合成燃料用の CO<sub>2</sub> は DAC もしくはバイオエネルギーからの CO<sub>2</sub> 排出回収に限定する必要があるとの指摘もある。しかし、原理的に差異がないので、全体システムにおける経済合理性の中で評価する必要がある。CCU の評価は難しく、過大、過小の両方の評価が見受けられ、実態を踏まえつつ、全体システムでの、より良い評価を試みるのが重要である。

### 1.2. 世界モデルによる合成燃料(CCU の代表例)の役割の評価

世界エネルギーシステム・温暖化対策評価モデルDNE21+による世界全体のカーボンニュートラルの対策の分析例について示す。DNE21+は 500 程度の技術を具体的に考慮しており、世界を 54 地域に分割し、2100 年までの期間を分析できる。ここでは、特にシステムの分析が重要と考えられる合成燃料について分析結果を紹介する。合成メタン、合成石油の詳細な評価は、それぞれ参考文献 1)、2)を参照されたい。参考文献 1)では、各国間の排出削減目標の限界削減費用に差異が大きい場合、限界削減費用が相対的に小さい国でメタネーション製造を行い、相対的に高い国に合成メタンを輸出して利用することが経済合理的な対応となるため、特に合成メタンの経済性が大きくなりやすいことを示している。ここでは、世界の限界削減費用が均等化する、合成燃料にはやや保守的な結果となりやすいシナリオについて分析した結果のみを示す。

表1はモデル分析の想定シナリオである。

図1に合成燃料のエネルギー源となる水素の製造、利用について示す。太陽光発電のコスト低減が標準的な場合(2DS\_1 シナリオ)、石炭・褐炭+CCS からの水素製造(ブルー水素)が、コスト低位の場合(2DS\_1 以外のシナリオ)は、太陽光からの水素製造(グリーン水素)が主たる製造方法となっている。利用については、発電、鉄鋼部門における水素直接還元製鉄、運輸部門での利用など、水素の直接的な利用も多く見られるが、合成メタン、合成石油といった回収 CO<sub>2</sub> を用いた合成燃料利用も経済合理的な対策と評価される。図2には、世界の合成燃料の CO<sub>2</sub> 利用量を示す。この量は、合成燃料(カーボンフリー水素)利用による、化石燃料代替による CO<sub>2</sub> 削減効果とも合致する。なお、合成燃料用に利用される CO<sub>2</sub> は、DAC を想定した 1.5°Cシナリオでも、DAC やバイオマス燃焼からの CO<sub>2</sub> 回収に限定されず、化石燃料燃焼の回収 CO<sub>2</sub> が主に利用される結果となっている。

表1 モデル分析のシナリオ

シナリオ名	世界排出シナリオ	【供給側】再エネコスト(太陽光発電コスト)	【需要側】シェアモビリティ進展(完全自動運転車実現)	【負排出技術】大気CO <sub>2</sub> 直接回収技術(DAC)
2DS_1	2°C未満(<50%): IEA ETP2017の[2DS]相当	標準	想定せず	想定せず
2DS_2			シェアモビリティ進展(完全自動運転車実現)	想定せず
2DS_3				
B2DS_2	2°C未満(>66%): IEA ETP2017の[B2DS]相当	低コスト(中東・北アフリカ中心に)	想定せず	想定せず
B2DS_3			シェアモビリティ進展(完全自動運転車実現)	想定せず
B1.5D_3_DAC	2100年1.5°C未満(>66%): 気温のオーバーシュート有	低コスト(中東・北アフリカ中心に)	シェアモビリティ進展(完全自動運転車実現)	DAC実現(コスト低位)【DAC想定無しの場合、1.5°Cは実行可能解無し】

注)①太陽光発電コストについては、標準シナリオで 2050 年に 60\$/MWh 以下が太陽光発電の世界全体のポテンシャルの 6%程度、60~80\$/MWh が 24%程度。コスト削減シナリオでは、30\$/MWh 以下が全ポテンシャルの 15%程度、30~40\$/MWh が 14%程度のコスト分布を想定。②完全自動運転車実現シナリオでは、完全自動運転車が 2030 年以降実現すると想定し、それによって、ライドシェア、カーシェアリングが進展すると想定。③DACの必要エネルギーは 2050 年時点で 4.7 GJ/tCO<sub>2</sub>を想定

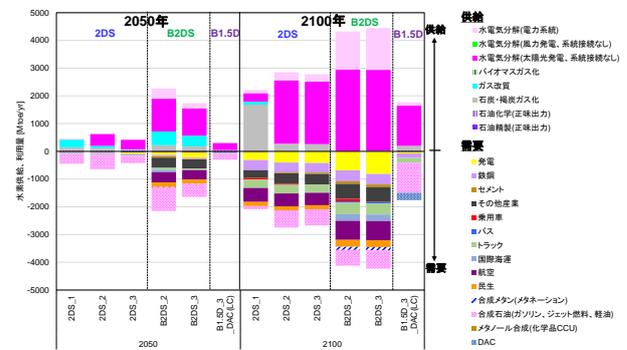


図1 世界の水素の需給バランス

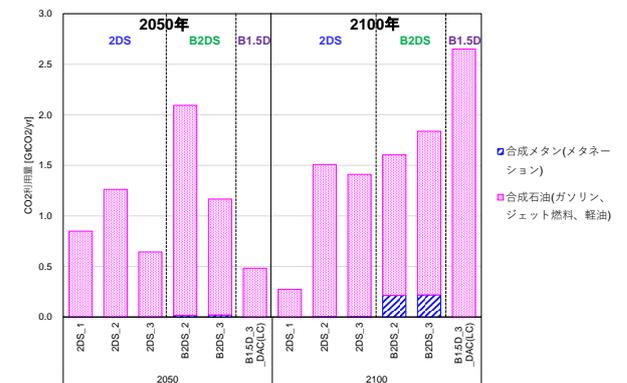


図2 世界の合成燃料 CCU 利用

合成メタンの利用は、都市ガスでの利用によって、既存インフラおよびガス機器を活用しつつ、カーボンニュートラル実現に寄与することとなる。また、合成石油についても、道路交通部門において既存インフラやハイブリッド車等を含む既存技術を活用しつつ、カーボンニュートラル実現を可能とする。また、航空、海運、産業などで、電気や水素への代替が難しい対策にも有効となる。

CCU としての合成燃料は、水素供給と一体的に評価する必要があり、評価が容易ではないが、これらのシステム分析からも、カーボンニュートラル実現の重要な1ピースとなり得ることがわかる。

## 2. 世界エネルギー経済モデルを用いた国境炭素調整の導入による影響分析

### 2.1. 国境炭素調整に関する背景

2050年までにネットゼロ・エミッションを達成するという目標が世界各国で掲げられている。ある国・地域の温室効果ガスの削減費用負担が他の国・地域より大きくなると、当該国・地域のエネルギー多消費産業の国際競争力に影響を与えるとともに、CO<sub>2</sub> 排出量が他の国・地域にリーケージ(国内製品の海外製品による代替および生産拠点の海外移転)する可能性がある。これに対処するためのオプションの一つとして国境炭素調整(BCA: Border Carbon Adjustment)が議論されている。一般的に BCA は排出削減努力が不十分である国からの輸入品に対して国内産品と同等の負担を課す国境措置である。

2019年12月に欧州委員長のフォン・デア・ライエン氏は2050年までに温室効果ガス排出量を実質ゼロとする目標を含む「The European Green Deal」<sup>3)</sup>を公表した。その中で BCA に関するロードマップを示し、2020年7月の欧州首脳会議で2021年前半に制度設計を終了し、2023年の初頭までに導入するということが同意された。一方、BCA は世界貿易機関(WTO)ルールとの整合性や各財の炭素含有量の推計および税率の調整などの課題がある。

### 2.2. 分析の方法

そこで、本研究では RITE で従来から開発してきた世界エネルギー経済モデル DEARS<sup>4)</sup>を用いて BCA の影響について分析を行った。DEARS は世界全体の消費効用最大化を目的関数としたトップダウン型経済モジュール(一般均衡型)と簡略化されたボトムアップ型エネルギーシステムモジュールの統合モデルである。経済モジュールでは、非エネルギー16産業を想定し、国際産業連

関表 GTAP に基づく産業連関構造を明示してモデル化している。貿易に関しては、輸入財と国内財の代替性を考慮したアーミントン構造を定式化している。

本研究では鉄鋼製品を事例に取り上げ、国境調整として2種類の関税方法を想定し、複数ケースのもとで経済影響および CO<sub>2</sub> 排出量を示す。

#### ① BCA 関税

一般的に BCA 関税は、輸入品に対して、その生産国の当該製品に体化された CO<sub>2</sub> 重量の平均値に応じて税率が決定される。この場合、同一製品内の異質性は考慮されていない。

#### ② CSTR (Cooperative Sectoral Tariff Reduction) 関税

CSTR 関税とは、より CO<sub>2</sub> の排出低減を促すため、同一製品内の異質性を考慮して、製品の原単位に基づいて税率を決定するものである(参考文献 5 を参照)。ただし、各国内の鉄鋼生産のエネルギー原単位の分布を推計することは相当な困難が伴うため、本分析では仮想的に以下の通り想定した。鉄鋼製品を、エネルギー原単位に対応した3種類の仮想的な製品グループ(世界共通)に分類し、原単位に関して、Good (0.10[GJ/\$]), Middle (0.80), Poor (1.50)を想定した(以下、Good, Mid., Poor と記す)。その上で、国・地域毎の平均原単位に合致するようにそれぞれのグループに属する比率を想定した。

輸入財と国内財については、参考文献 6-7)を参考に、標準ケースの代替弾力性( $\delta$ )を1.5と想定した CES 型関数を用いて、輸入財と国内財の需要に関する代替性を想定した。製品グループ間の需要については、代替弾力性 2.0 を想定した。

本研究の分析ケースを表 2 に示す。本研究では、日米 EU が協調して国内排出削減対策を実施する一方、それ以外の国については排出削減対策がなされない、と簡略化した仮想的な想定を行った上で、国境炭素措置やそれに対抗した報復措置による影響を分析した。炭素関税の課税方法については前述の 2 種類を想定し、最も原単位の優れた製品グループへの減免による影響も検討した。

炭素価格・炭素関税は、EU-ETS の EUA 価格 (2019 年 7 月)を参照し 32\$/tCO<sub>2</sub> を想定し、税収は政府消費(一般会計)に用いられると想定した。課税対象は電気・熱配分後排出量とした。また、国内対策により上昇した価格が輸出時に相殺される輸出リバートも考慮した。報復措置はさまざまな方法が考えられるものの、ここでは報復関税として炭素関税と同率を、同じ鉄鋼製品に対して課されると想定した。本研究におけるベースライン(特段の温暖化政策を考慮しないケース)の社会経済シナリオは、中位シナリオ SSP2 を想定した(参考文献 8)参照)。

表 2 モデル分析のケース

ケース名	国内の削減対策を実施地域	炭素関税の方法 [日米 EU が実施]	Good 最優遇 [課税ゼロ] (-G)	報復関税 [その他地域が実施] (-R)
(1) TRI	日米 EU	×	×	×
(2) WLD	全地域	×	×	×
(3) TRI-BCA	日米 EU	BCA	×	×
(4) TRI-BCA-R	日米 EU	BCA	×	○
(5) TRI-CSTR	日米 EU	CSTR	×	×
(6) TRI-CSTR-R	日米 EU	CSTR	×	○
(7) TRI-CSTR-G	日米 EU	CSTR	○	×
(8) TRI-CSTR-G-R	日米 EU	CSTR	○	○

### 2.3. 分析結果

#### (1) 国境炭素調整の課税方式による影響

日米 EU が実施する BCA(ケース 3 及び 4)と CSTR(ケース 5~8)は、ケース(1)比でそれぞれ鉄鋼・生産額計がプラスに転じていることから、いずれの課税方式も日米 EU の国際競争力低下を軽減する(図 3)。また、炭素リーケージに関し、BCA 及び CSTR を導入した場合、ケース(1)比で見ると、それぞれ炭素リーケージを縮小する効果がみられる(図 4)。

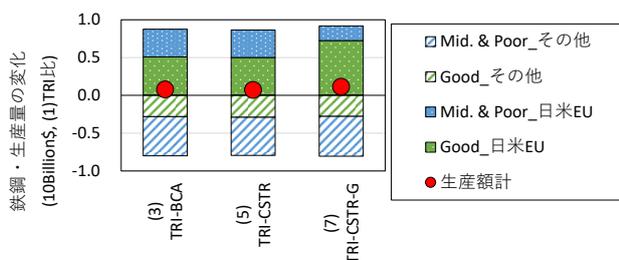


図 3 国境調整による鉄鋼・生産量への影響(2020 年)

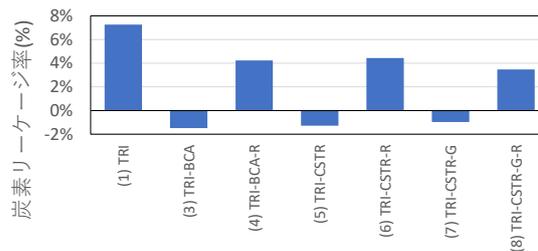


図 4 炭素リーケージ率(2020 年)

注:日米 EU のベースライン比 CO<sub>2</sub> 削減量(鉄鋼製品)に対する、その他地域の CO<sub>2</sub> 増加量

BCA、CSTR ともに原単位の優れた製品(Good)への生産シフトを促すと推計されるが、課税方式による違いの影響は大きくない。そして、世界全体の CO<sub>2</sub> 削減効果に関しても、図 4 の例えばケース(3)とケース(5)の比較から課税方式の違いによる差異も大きくない。むしろ Good 製品への減免措置は、Good への生産シフトに対する効果は大きい、世界全体の排出削減効果は劣る。

#### (2) 報復による影響

日米 EU の国境調整措置に対抗して、その他地域で実施される報復ケースでは、報復無しの場合と比べその他地域における日米 EU からの輸入価格が相対的に悪化するため、日米 EU からその他地域へ生産がシフトする(図 5)。また、報復関税により日米 EU の国際競争力は低下し、リーケージは悪化する(図 4)。ただし、世界全体の排出量への影響も非常に小さいと推計された。

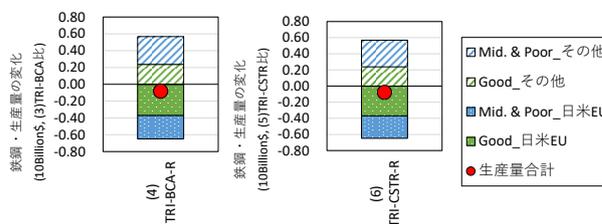


図 5 報復関税による鉄鋼・生産量への影響(2020 年)

#### (3) 国際協調による影響

世界が排出削減に協調して、その他地域を含めて鉄鋼製品の国内生産の全てに同率の炭素価格が課される

と想定したケース(2)では、ケース(1)に比べその他地域のMid と Poorの生産が減少する一方、日米EUの生産が増加する(図6)。

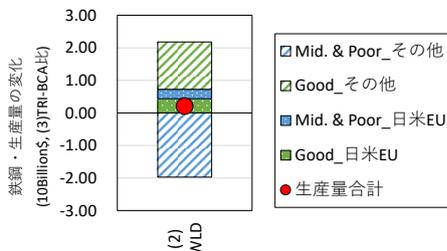


図6 国際協調による鉄鋼・生産量への影響(2020年)

#### (4) 地域別影響の比較

日米EUが国境調整措置を実施した場合には、中国などのその他地域は報復措置を実施するインセンティブが高い(図5)。そのような状況下において、日米EUの各地域への影響は異なり、報復による悪影響は日本では相対的に大きく米国では小さい(図7)。その要因として以下の2つが考えられる。第一に、日本は転炉鋼、電炉鋼それぞれの原単位は優れているが<sup>9)</sup>、転炉鋼・電炉鋼を区別しない枠組みでは、日本の優位性は適切に反映されず、炭素価格・関税が課せられた際の鉄鋼製品の価格の上昇率は「日本(転炉鋼比率が高い) > EU > 米国(電炉鋼比率が高い)」の順になると推計されるためである。第二に、鉄鋼製品の輸出入比も国境調整措置・報復措置による地域別影響の違いの要因となる。2020年ベースラインにおける鉄鋼製品の輸入量に対する輸出量の比率は、日本5.0、米国0.9、EU2.0、中国1.5と推計される。日本の輸出入比は非常に大きく、国境措置によるメリットが小さいため報復措置による悪影響が大きいことが示唆される。

一方、米国では輸入比率が高いため国境措置によるメリットが大きく、報復措置による悪影響も小さい。また、転炉鋼・電炉鋼を区別しない枠組みのもとでは、電炉比率が高い米国は原単位が優れて算出される。よって、この枠組みでは米国では報復を想定したとしても国境調整措置を実施するインセンティブが高い。

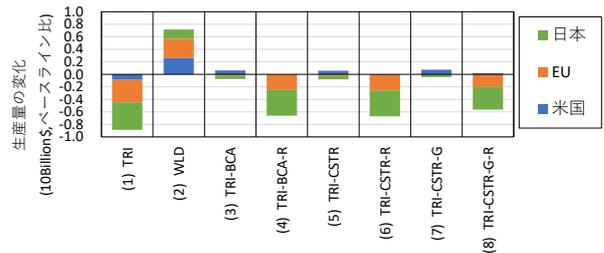


図7 日米EU地域別の鉄鋼・生産量の変化(2020年)

#### (5) 国内財と輸入財の代替弾力性に関する感度分析

国内財と輸入財の代替弾力性が大きい高位想定( $\delta = 2.8$ )の場合<sup>10)</sup>、ケース(1)では、その他地域への移行が大きくなるために、標準想定( $\delta = 1.5$ )よりも炭素リーケージ率は増加する(図8)。また、国境調整措置によるリーケージ縮小の効果はあるが、報復措置によって標準想定よりもリーケージ率は増加する。

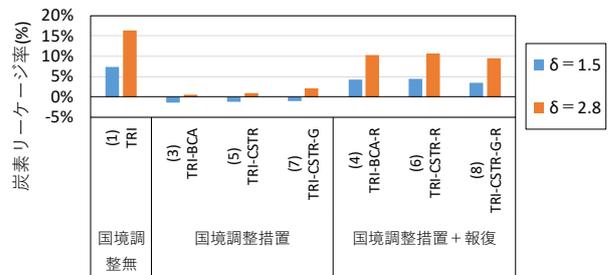


図8 代替弾力性による炭素リーケージへの影響(2020年)

## 2.4. まとめ

製品平均の原単位に基づく一般的なBCA関税と各製品の原単位に基づくCSTR関税の2種類の関税方式は、国内削減策による国際競争力低下を軽減し、CO<sub>2</sub>リーケージを縮小させる効果がみられ、両方式による違いはほとんどないと推計された。一方、報復措置により日米EUの国際競争力は低下し、世界全体の排出量への影響は非常に小さいものの炭素リーケージが悪化すると推計された。

この枠組みのもとでは、国境調整を導入するインセンティブは、国・地域の生産構造や貿易構造によって異なることが示唆された。

本研究の今後の課題として、鉄鋼製品に関しては転炉鋼・電炉鋼の区分の拡張や、その他のエネルギー多消費財や主要な貿易財への拡張を検討することが重要と考えられる。

### 3. 技術革新・社会変化による低エネルギー需要社会の研究事業(EDITS)の概要

RITE は、2020 年度に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)を受託し、国際的な研究協力の下での研究を開始した。

#### 3.1. 背景

我々は、エネルギーを消費したいがためにエネルギーを使っているわけではない。サービスを楽しみたいがために、そこに体化されたエネルギーを消費している。そして、そのサービスを得るために、特に最終需要に近いところで多くのエネルギーが無駄に使われている(図 9)。

最終的に必要なサービスのためのエネルギーは、一次エネルギー消費全体の 5%前後とされている。しかし、我々の利便性を阻害する「隠れた費用」を含めると、多くが合理性を有しているため、社会のエネルギー需給がこのような形で成り立っていた。ところが、技術進展とともに変わりつつある。例えば、人がいないときの照明は自動消灯も実用化してきたし、エアコンも人のいるところを集中的に冷やすことが可能となり、サービスの低下を抑えつつ省エネにつながった。一方、社会システムとしてはまだまだ無駄が多い。

情報通信技術(ICT)の技術進展は、最終エネルギー需要側の社会イノベーションを誘発するポテンシャルがあり、①独立した技術から技術間の接続へ、②所有から利用へ、③シェアリングエコノミー、サーキュラーエコノミーの誘発 につながる可能性がある。

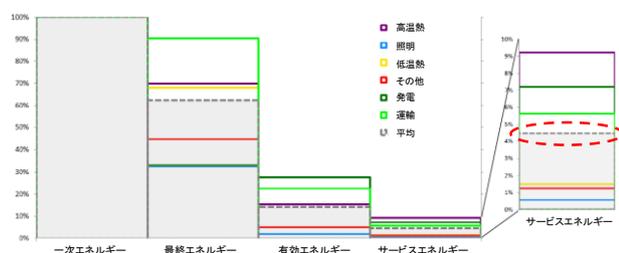


図 9 世界における各エネルギー利用段階でのエネルギー消費量 (一次エネルギー消費量を 100%としたとき)<sup>11)</sup>

例えば、ICT 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、自家用車は活用されていない。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。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。それにより SDGs の同時達成に寄与し得る。

自動車に限らず、アパレル、食料システムなど、多くにおいて過剰な生産がなされており、それらも ICT の進展により削減できる可能性がある。直接的にエネルギーを低減するだけでなく、サービス、製品に体化されたエネルギーを低減することで、社会全体のエネルギー需要の抑制をはかることが重要と考えられる。

一方、ICT により、データセンターでのエネルギー消費の増大や、その他、様々なリバウンド効果も考えられるため、行動変化も含めた総合的な分析が求められる。

#### 3.2. EDITS の概要

このような背景の中、EDITS 事業では、以下のような内容の研究を開始したところである。

- 研究コミュニティの構築: 需要側に焦点を当てた、新しいデータ、新しい概念、方法論、および政策分析の共有を通じて、研究と政策分析に対する相互作用を通じたより良い理解の促進
- 最先端の需要側モデルの改良: 方法論やモデルの相互比較、学問領域、部門、環境分野を超えた、概念、方法論の共有により、環境および気候政策分析の需要側モデルの更なる改良を実施
- モデル相互比較分析: 特に、デジタル化、シェアリングエコノミー、SDGs と気候目標の統合による相乗効果を有する政策デザイン等に焦点を当てながら、需要側の政策による、SDGs に対するシナジーとト

リードオフ、潜在的な影響、障壁を評価する、モデル分析やシミュレーションを実施

国内外の多くの研究機関、研究者が協力して、この重要かつ難しい分析課題に取り組むこととしており、RITE および国際応用システム分析研究所(IIASA)が中心となり、東京大、大阪大、米ローレンス・バークレー国立研究所(LBNL)、米スタンフォード大、米ウィスコンシン大、中国清華大の他、韓国、イタリア、ドイツ、タイ、ブラジルなどの研究機関、大学などと連携している。

#### 参考文献

- 1) 佐野 他、エネルギー・資源学会論文誌、42(1)、2021
- 2) 金星 他、第 37 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス、2021
- 3) European Commission, The European green deal
- 4) Homma, T., and Akimoto, K., Energy Policy 62, 2013
- 5) Banks, G.D. and Fitzgerald, Climatic Change, 162, 2020
- 6) MIT, EPPA Model Structure
- 7) 日経センター、日本経済研究センターの一般均衡モデル JCER-CGE による分析、2009
- 8) O' Neill, B.C., et al., Climatic Change 122, 2014
- 9) Oda, J., et al, Energy Policy, 44, 2012
- 10) Global Trade Analysis Project (GTAP)
- 11) Global Energy Assessment, 2012