

## システム研究グループ



グループリーダー・  
主席研究員

秋元 圭吾

### 【コアメンバー】

主席研究員	友田 利正	主任研究員	林 礼美
副主席研究員	永田 敬博	研究員	有野 洋輔
主任研究員	和田 謙一	研究員	魏 啓為
主任研究員	長島美由紀	研究員	王 楠
主任研究員	本間 隆嗣	研究員	陳 姝凝
主任研究員	佐野 史典		
主任研究員	小田潤一郎		
主任研究員	山川 浩延		
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、システムの思考、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。最近の研究の中から3つのテーマを紹介する。1つ目は、GDPとCO<sub>2</sub>排出量のデカップリングに関する分析、2つ目は、環境調和型製品の普及・展開による貢献の評価、3つ目は、シェアリングエコノミーの進展を考慮した社会経済シナリオの下での温暖化対策の評価である。国内外の政策動向を踏まえながら、気候変動に関する政策において重要と考えられるトピック等について、分析、評価を行うことで、より良い温暖化対策・政策立案に貢献してきている。

### 1. GDPとCO<sub>2</sub>排出量のデカップリングに関する分析

#### 1.1. はじめに

これまでGDP成長とCO<sub>2</sub>排出量増加は強い正の相関が見られるとされてきたが、近年になって、その相関が必ずしもはっきり見られなくなる場合があり、GDP成長とCO<sub>2</sub>排出量増加の「デカップリング」が起こってきているのではないかと指摘も見られる。図1は世界のGDP成長とCO<sub>2</sub>排出量増加の関係を示しているが、2013～2016年の世界排出量はほぼ横ばいであり、短期的にはデカップリングの傾向がみられたが、2017年は再び上昇に転じている。長期の傾向で見ると、むしろ2009～13年間の排出の伸びが大きかったものが調整されてきているとも考えられる。

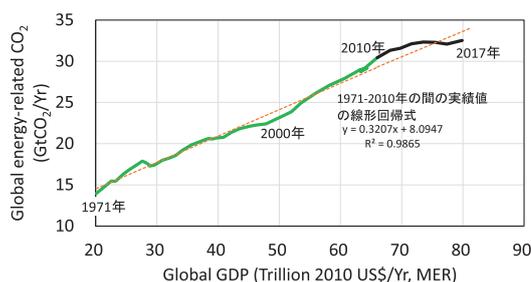


図1 世界の経済成長とCO<sub>2</sub>排出量の関係  
注：IEA統計、IMF統計を用いて作成

また、先進国の一部では、GDPは上昇しているものの、CO<sub>2</sub>排出量は減少している傾向も見られる。そこでRITEでは、そのような動向が現れている要因を評価するため、最新の統計データに基づき、各国の消費ベースCO<sub>2</sub>排出量を推計し、それらの要因等を分析した。

#### 1.2. 消費ベースCO<sub>2</sub>排出量の推計

世界CO<sub>2</sub>排出量の増加が鈍化した期間の一部を含む2000～2014年について、主要国の消費ベースCO<sub>2</sub>排出量を分析した。グローバルなデカップリングへの寄与を評価するためには、世界全体をカバーした上で各国の産業の国際分業や貿易、消費構造などを考慮することが重要であり、消費ベースCO<sub>2</sub>排出量の評価は、これらを反映した手法と言える。

生産ベースCO<sub>2</sub>排出量は、当該国内で財・サービスを生産・消費した時に燃焼した化石燃料からのCO<sub>2</sub>排

出量を計測したものであり、通常の統計におけるCO<sub>2</sub>排出量に相当する。一方、消費ベース排出量は、当該国内で消費した財・サービスについて、それらに関わる直接・間接CO<sub>2</sub>排出量を示す。よって、消費ベースCO<sub>2</sub>排出量では、輸出財を生産した国ではなく、輸出財を輸入した後に消費した国で排出量をカウントする。各国の消費ベースCO<sub>2</sub>排出量は、CO<sub>2</sub>排出量（IEA統計）と国際産業連関表（WIOD）のデータを用いて推計した。主要先進国では、2000年以降、消費ベースCO<sub>2</sub>排出量が生産ベース排出量より継続的に大きい傾向が推計されたが、それらの推移は国・地域によって異なる。

図2に、EU28の生産ベースおよび消費ベースのCO<sub>2</sub>排出量を示す。2008年まで、消費ベースCO<sub>2</sub>排出量の伸びの方が大きく、消費ベースと生産ベースの排出量の差分は増大傾向であった。主要要因は、途上国（主に中国）の機械製品の輸入が大きく増加し、それらに体化したCO<sub>2</sub>の増加である。域内でのCO<sub>2</sub>排出は減少したが、域外から製品の調達がなされており、実際には世界の他の国で排出がなされ、世界全体での大幅な削減の寄与は小さいと言える。リーマンショック後の2008年以降は、引き続き輸入額は増加したものの、輸入元の途上国での原単位の改善の進展などにより、消費ベースと生産ベースの排出量の差分はやや縮小の傾向が推計された。

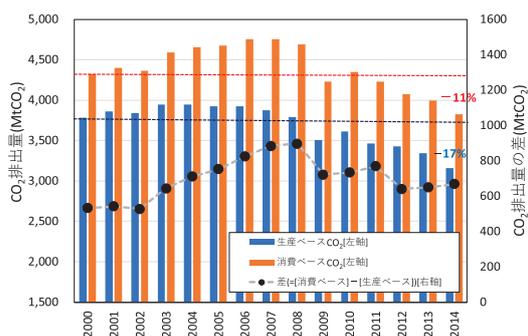


図2 EU28の生産・消費ベースCO<sub>2</sub>排出量

一方、日本については、消費ベースCO<sub>2</sub>排出量は生産ベースとほぼ同様な変動をしており、CO<sub>2</sub>排出量の差異は緩やかに小さくなっている（図3）。すなわち、日本ではCO<sub>2</sub>原単位の大きい製造業の生産を比較的多く維持し続けたために、輸入依存による炭素リークエージを拡大させていない。

米国では、2000年以降、EUと同様に、消費ベースと生産ベースCO<sub>2</sub>排出量の差分が拡大傾向にあっ

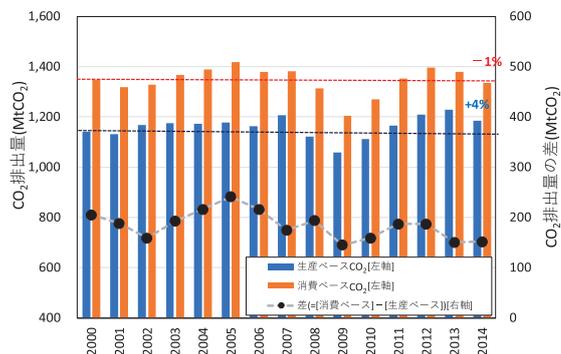


図3 日本の生産・消費ベースCO<sub>2</sub>排出量

たが、シェールガスの国内生産の拡大により2006年以降は縮小傾向がみられる。安価なエネルギー利用が可能となり製造業の米国内への回帰による影響と考えられる。

主要先進国のCO<sub>2</sub>原単位に関する比較として、生産ベースCO<sub>2</sub>排出量を用いてCO<sub>2</sub>原単位（実質GDP当たり排出量）で評価すると、日本は他国と比べ改善が緩やかである（図4（a））。一方、消費ベースCO<sub>2</sub>原単位で比較すると、東日本大震災による原発停止の影響を除けば、原単位改善の程度は欧州と大きな差異はみられない（図4（b））。

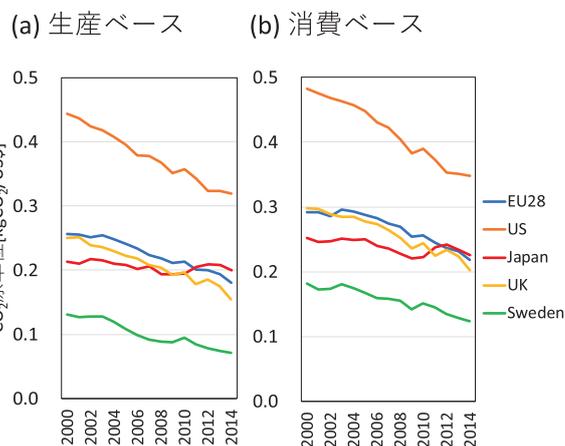


図4 主要国の実質GDP当たり排出量  
注：GDPは2010年価格ドル・市場為替レート換算値

### 1.3. デカップリングに関する分析のまとめ

持続的な温暖化対策のためには、GDP成長とCO<sub>2</sub>排出量増加のデカップリングが重要である。真にグローバルなデカップリングに資する動向が見られるのかを評価するためには、産業の国際分業などの影響を考慮した、各国の消費ベースCO<sub>2</sub>排出量の評価が有効である。EUなどでみられるデカップリングは、消費

構造の変化ではなく、輸入による海外依存が進んだ影響が大きく、世界の別の地域にCO<sub>2</sub>排出量が移転していると評価された。世界全体でのデカップリングを達成するためには、グローバルでの対策が重要であり、消費構造の転換、すなわち最終製品やサービスの革新が必要である。

## 2. 世界CO<sub>2</sub>排出削減への環境調和型製品の普及・展開による貢献の評価

### 2.1. はじめに

経済産業省は2017年4月に「長期地球温暖化対策プラットフォーム報告書」をとりまとめた。報告書では、「国際貢献」、「グローバル・バリューチェーン」、「イノベーション」の3本の柱で大幅な排出削減に向けた取り組みを強化していくとした。また経団連は、2018年11月に「グローバル・バリューチェーンを通じた削減貢献」として、様々な業種・企業による、多種多様な製品・サービス等の削減貢献の「見える化」事例をとりまとめた。

RITEでは、「グローバル・バリューチェーン (GVC)」での世界での貢献を包括的に評価するために、世界エネルギー・温暖化対策評価モデルDNE21+および世界エネルギー経済モデルDEARSを用いて、我が国の2050年に向けた環境調和型製品の普及・展開による排出削減貢献量とそのときの経済的な効果について試算を行ってきている。

### 2.2. 分析にあたっての排出削減シナリオの想定

IPCC第5次評価報告書では430~480 ppm CO<sub>2</sub>eqの排出経路は2℃目標を66%以上の確率で達成可能としており（平衡気候感度が2.0~4.5℃がlikely、最頻値が3.0℃程度の場合）、そのとき、2050年の世界GHG排出量は2010年比40~70%程度の削減が必要としている。これに相当する世界排出削減経路を想定して分析を行った。日本については、2050年のGHG排出削減率を2013年比▲50%、▲65%、▲80%の3種類のシナリオを想定した。

### 2.3. 世界全体の温暖化対策の評価

RITEの世界エネルギー・温暖化対策評価モデルDNE21+によると、世界全体の2050年における部門別・技術別GHG排出削減効果は図5のように推計された。ベースラインにおいては、2050年に80 GtCO<sub>2</sub>eq/yr程度の排出量になると見通される。

2010年比▲40%~▲70%のためには、様々な対策が必要であり、発電部門では、CCSの他、火力発電での対策（高効率化、燃料間転換）、原子力発電の拡大、バイオマスや太陽光発電といった再エネの普及拡大などが大きな排出削減貢献となっている。エネルギー需要部門においても、産業、運輸、民生それぞれの部門において相当の排出削減が見込まれている他、CO<sub>2</sub>以外のGHG（メタン等）についても排出削減が見込まれている。

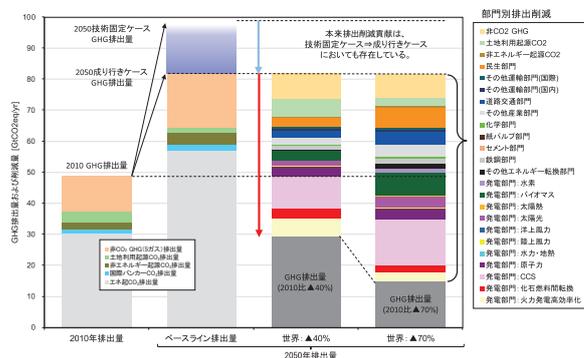


図5 世界全体の2050年における部門別・技術別GHG排出削減効果 (DNE21+による推計)

### 2.4. GVCにおける世界排出削減貢献推計方法

GVC全体での排出削減貢献量は、最終的には最終消費段階で利用される製品の製造時および利用時の排出削減量に帰着できる。しかし、DNE21+では、モデル化の制約から排出削減量は、すべてを最終製品段階で計上することが難しく、電子・電機製品や自動車などの最終製品の利用時と、発電、製鉄等の生産プロセスにおける排出削減量とに分けて算定される（図6）。このような扱いにはなるが、GVC全体の排出量をカバーでき、削減貢献量全体の整合性を有した評価を行った。

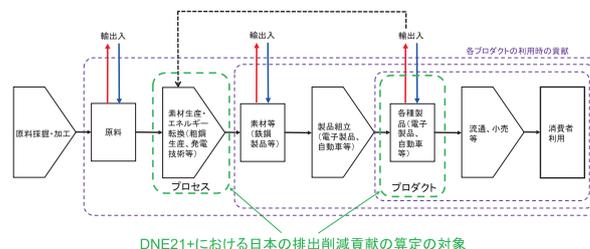


図6 サプライチェーンにおける排出削減貢献量推計

各部門において現時点でのデータ利用可能性の中でより良いと考えられた方法を採用し、以下のような方針で日本の寄与分算定を行った。

- ・基本的には日本企業の生産額（売上高）シェアの実

績を利用。なお、部品等で見ると、日本はより大きな貢献を行っているケースが多く見受けられるが、基本的には最終製品が日本企業である生産額実績を利用。

- ・生産額シェアの入手が困難な部門・技術については、機械等の付加価値額シェア実績（日本は7%）を利用。

各技術・部門における日本の貢献比率を表1のように想定した。

表1 想定したGVCにおける各部門の日本の貢献比率

分類	技術	日本の貢献比率の想定
発電	原子力発電	19%
	風力発電（陸上）	0%
	風力発電（洋上）	6%
	太陽光発電	4%
	太陽熱発電	0%
	水力発電	0%
	地熱発電	55%
	火力高効率発電	21%
	その他発電	7%
	化石燃料間転換	0%
その他エネルギー転換		7%
産業		7%
運輸部門（自動車）		28%
運輸部門（その他）		7%
民生部門		13%
土地利用変化CO <sub>2</sub> （植林等）		0%
産業プロセスCO <sub>2</sub> 、非CO <sub>2</sub> GHG		7%

## 2.5. GVCにおける世界排出削減貢献およびGDP影響

DNE21+モデルから推計される投資額（図5に対応した投資額の推計）と、GVCにおける技術別の海外排出削減貢献（表1）をベースに、世界での排出削減貢献における日本の寄与分を達成する際の産業別の投資額を算定した。ただし、DNE21+モデルから推計される投資額には建設費等が含まれるため、日本機械輸出組合の報告における調査国平均の機器資材比率53%を参考にした。これには汎用機器も含まれるため、この半分の26%が日本帰属と想定した場合についての結果を掲載する。基準ケースを「世界▲40%、日本▲50%」とし、経済モデルDEARSで推計した各ケースの産業別の生産減少割合によって、海外貢献量による産業別の投資額の減少を考慮した上で、日本の海外削減貢献としての投資増分を推計した。その上で、日本の海外削減貢献としての産業別の投資増分によって国内で誘発されるGDPを推計した。

日本のGDP影響を表2に示す。日本国内▲50%の場合であれば、海外貢献分によって見込まれる日本の投資増分を考慮すれば、日本のGDPはベースライン

に比べて増加も見込まれる。そのため、環境と経済の両立の機会が成立する可能性がある。

一方、日本▲80%の場合では海外貢献分が相対的に小さくなり、国内削減によるGDP低減を十分には補えないため、海外貢献分を考慮しても正味で大幅な負のGDP影響となると推計された。そのため、技術革新等による対策の大幅なコスト低下なしには、環境と経済の両立は達成することが非常に難しいと推計された。

各ケースの国内排出削減率における国内生産影響を考慮した、2050年のGVCにおける日本の排出削減効果を図7に示す。日本が厳しい排出削減に取り組む▲80%の場合、国内削減分は増加するが、国内製造業の維持が難しくなるため、▲50%の場合に比べて海外貢献分は大きく減少し、世界全体への排出削減貢献量は小さくなると推計された。例えば、世界で▲70%時に、日本国内▲80%（ベースライン比で約8億トン削減）とすると、世界削減貢献は約25億トンと推計されるが、一方、日本国内▲50%（ベースライン比で約5億トン削減）とすると、世界削減貢献は約59億トンと推計され、国内排出削減の差分の3億トンの10倍を上回るような削減効果（差分は約34億トン）を海外における排出削減において期待できる。

表2 日本のベースライン比のGDP影響（2050年）

	世界全体▲40%		世界全体▲70%	
	海外貢献考慮なし	海外貢献考慮あり	海外貢献考慮なし	海外貢献考慮あり
日本▲50%	-0.9%	+0.8%	-1.0%	+1.6%
日本▲65%	-2.0%	-0.3%	-2.7%	-0.4%
日本▲80%	-7.2%	-6.5%	-7.1%	-6.1%

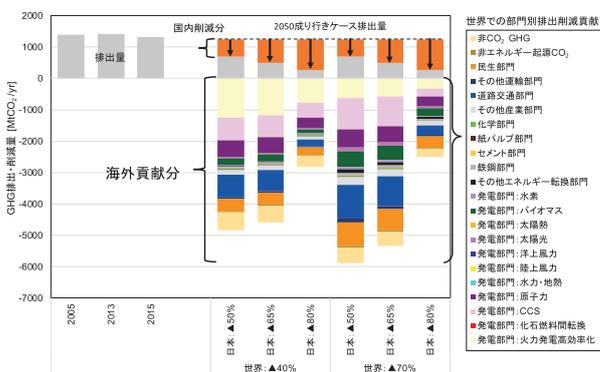


図7 GVCにおける日本の排出削減効果（2050年）

## 2.6. 環境調和型製品の普及・展開による貢献の評価のまとめ

とりわけ日本においては、各種製造プロセスにおける費用対効果の高いエネルギー効率向上や排出削減余地は乏しくなっている。プロセスではなく、プロダク

トに着目し、利用段階で省エネルギーや低排出につながる設備、製品の展開による排出削減が重要になってきている。これは、LCA的な視点からの対応であり、今後一層重要性を増していくと考えられる。こういった環境調和型製品の普及・展開をビジネススペースで競うことは、環境と経済の両立を実現する一つの方向性であり、本研究ではその効果を定量的かつ整合的に分析した。

### 3. シェアリングエコノミーの進展を考慮した社会経済シナリオの下での温暖化対策の評価

#### 3.1. はじめに

近年シェアリングエコノミーが注目を集めており、我が国においてもその推進が検討されている。その領域は多岐にわたるが、対象を「移動」とした場合、現状のサービスはカーシェアリングとライドシェアリングに大別される。これらのサービスは、例えば配車アプリのような、ITやAIといった技術の進展によって効率化される側面がある。また、移動サービスを担う自動車についても、それら技術の進展を取り込みながら、自動運転技術の開発が進められている。こうした技術進展によって、自動運転車をシェアする（ここでは自動運転シェアカーと記す）ような社会も将来像の1つとして考えられる。

ここでは、完全自動運転車によって大規模に普及が誘発され得るカーシェア、ライドシェアを考慮した社会経済シナリオの下での温暖化対策について、システム研究グループが開発してきている世界エネルギー・温暖化対策評価モデルDNE21+を改良した上で評価を行った。

#### 3.2. 自動運転シェアカーの想定

完全自動運転の実現には、サイバーセキュリティ対策を含む技術的な課題の他、事故が起きた際の法的責任の所在といった法制度上の課題等の多くの課題が存在しており、その実現時期は不確実である。ここでは2030年以降に利用可能となると想定した上で、文献<sup>1)</sup>等を参考にしつつ、自動運転シェアカーに関して表3のように想定した。なお、対象は乗用車としている。

DNE21+モデルでは、道路交通部門における旅客輸送需要は乗用車とバスに区分し、外生的なシナリオとして想定している。ここでは、自動運転シェアカーの有無に依らず、乗用車旅客輸送需要は一定であると想定した。しかしながら、利便性が高く、かつ安価な

表3 自動運転シェアカーに関する想定

項目	想定
自動化の費用	一台当たり10000\$ (2030年)。技術進歩による価格低減を見込み、2050年：5000\$、2100年2800\$と想定。
自動車の稼働率	従来の自家用車の3倍 (日本の場合、一台当たり30,000km)。
自動車の寿命	7~12年 (幅は地域による違い)。(従来の自家用車は13~20年と想定)
一台当たり乗車人数	ライドシェアリングにより次第に増大すると見込み、2050年:1.75人、2100年2人 (地域によらず一律と想定)。(従来の自家用車は2050年:1.1~1.5人、2100年:1.1~1.3人と想定)
自動車の燃費	従来の自家用車想定と差異なしと想定

輸送手段を手に入れたことによる輸送需要そのものの増加や、公共交通機関 (バスの他、鉄道) との競合 (公共交通インフラの充実度によって輸送モードの選択は影響される) も考えられる。更には、ユーザーは多様な嗜好を持っているため (例えば、他人と自動車をシェアすることをどう考えるか)、表3の想定ではその多様性を十分に考慮できているとは言えない。このような項目については、引き続き検討を行う予定である。

#### 3.3. 粗鋼生産シナリオの想定

前節の想定の下では、自動運転シェアカーの普及により、その普及を想定しない場合 (基準) に比べ、2050年の乗用車保有台数は25%、新車販売台数は41%程度に抑制されると評価される。その結果、シェアリングを考慮していない商用車も含む自動車用鋼板需要は基準比で58%、自動車用以外も含む全粗鋼需要では96%と評価され、基準で見込んでいる需要に比べ4%程度減少すると見積もられる。

ここでは、この減少分も踏まえた上で温暖化対策の評価を行った。なお、粗鋼以外にも、例えば自動車用プラスチック需要の減少等、自動車生産に関連する産業の活動量は低下すると見込まれる。このような各種部門の活動量について、十分に整合性をとった上での分析は、引き続きの検討課題である。

#### 3.4. モデル評価結果

表4に示す3つの社会経済シナリオについて、特段の温暖化対策を考慮しないベースラインシナリオと、2℃目標シナリオ (2030年までは各国の国別貢献相当、2050年には世界全体で2010年比▲40%の排出経路であり、50%以上の確率で2℃を達成し得る) について評価を行った。社会経済シナリオは、気候変動問題に対する国際研究コミュニティにおいて検討されているSSP (Shared Socio-economic Pathways) のうち、中位的なシナリオであるSSP2と、持続可能

な世界を描いたSSP1を想定している。SSP1は、SSP2に比べて技術進歩が高位（電気自動車や燃料電池自動車等のコスト低減がより進む）と想定しており、SSP1+自動運転シェアカーは更に自動運転シェアカーの普及を考慮したシナリオである。

表4 評価したシナリオ

シナリオ名	概要
SSP2	中位シナリオ (Middle of the Road)
SSP1	技術進歩高位など (Sustainability)
SSP1+自動運転シェアカー	技術進歩高位+自動運転シェアカー+粗鋼生産減少

図8、図9は、各シナリオの下での技術別乗用車保有台数、運輸部門のエネルギー種別消費をそれぞれ示している。従来型内燃機関車が主として選択されているSSP2に比べ、電気自動車等の技術進歩がより進むと見込んでいるSSP1では、電気自動車や燃料電池自動車がベースラインでもより広く普及し、運輸部門のエネルギー消費も削減されると評価されている。更に自動運転シェアカーの普及を考慮したSSP1+自動運転シェアカーシナリオにおいては、カーシェア、ライドシェアの効果によって乗用車の保有台数が大きく減少すると共に、ライドシェアリングによって人の移動需要（p-km）を満たしつつ自動車の走行距離（v-km）を抑制することから運輸部門のエネルギー消費も更に削減されるとの評価である。なお、乗用車はエネルギーコストに比べ車両コストが相対的に高く、モデルで想定している3年程度の投資回収判断年数の下で車両コストの増分をエネルギーコストの差で回収するには相当高い炭素価格が必要となるため、温暖化対策シナリオ（ベースラインと2℃目標）による違いよりも、社会経済シナリオ（技術進歩の見通しや自動運転シェアカーの有無）による違いが大きいとの結果である。

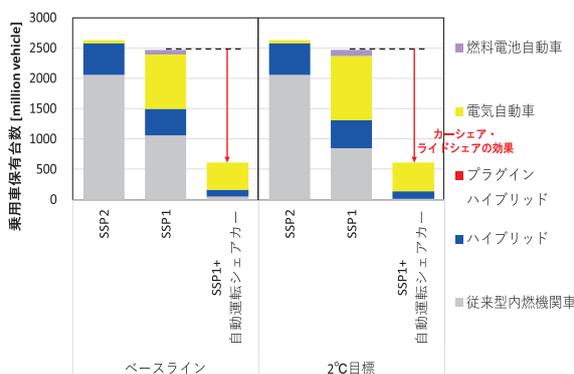


図8 2050年における世界全体の技術別乗用車保有台数

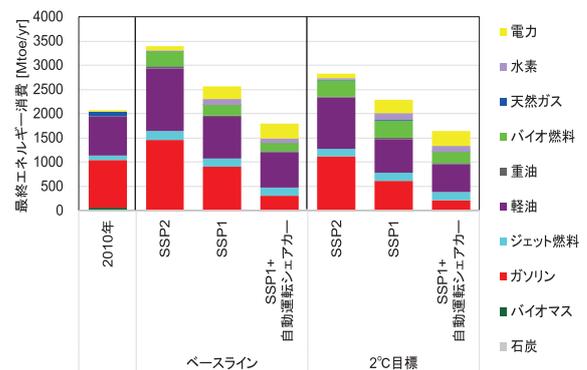


図9 2050年における世界全体の運輸部門エネルギー消費

この時の2050年におけるCO<sub>2</sub>限界削減費用は、SSP2：171\$/tCO<sub>2</sub>、SSP1：125\$/tCO<sub>2</sub>、SSP1+自動運転シェアカー：94\$/tCO<sub>2</sub>、と評価されている。SSP1+自動運転シェアカーシナリオにおいては、100\$/tCO<sub>2</sub>を下回るとの結果であり、運輸部門においてエネルギー消費の抑制が大きく進むため、2010年比▲40%を達成するために必要なその他部門に要求される排出削減水準が緩和され、例えば、厳しい排出削減下では運用できないCCSなしの石炭火力も一部導入されている。

### 3.5. まとめ

完全自動運転車によって大規模に普及が誘発され得るカーシェア、ライドシェアを考慮した社会経済シナリオの下での温暖化対策を、自動車台数低減が及ぼす粗鋼生産の減少もふまえて、DNE21+モデルを用いて定量的に評価した。自動運転シェアカーに関する想定や、他部門との整合性の確保は引き続きの重要な課題であるが、ここでのSSP1+自動運転シェアカーシナリオは、CO<sub>2</sub>排出削減のために費用が高い技術や対策を導入するだけでなく、ITやAIといった汎用的な技術の進歩に誘発されてカーシェアリングやライドシェアリングが大規模に普及するという社会の大きなイノベーションが起こることにより、現実世界においては実現が困難な高いCO<sub>2</sub>限界削減費用が無くともエネルギー需要が大きく低減し、2℃目標も達成できる可能性があるとのシナリオであり、大幅な排出削減への多様な道筋の1つと言える。

### 参考文献

- 1) L. Fulton et al.; Three Revolutions in Urban Transportation (2017)