

表4-2 | 世界のエネルギー指標

	2022	レファレンス		技術進展		
		2030	2050	2030	2050	
原単位(2022=100)						
産業	鉄鋼原単位	100	101.5	96.3	95.7	74.5
	窯業土石原単位	100	93.0	77.6	89.6	68.6
	化学原単位	100	97.1	75.7	91.3	61.8
	紙パルプ原単位	100	94.9	84.8	90.9	66.2
	その他産業原単位	100	99.8	75.4	93.9	51.7
運輸	乗用車の新車燃費(km/L)	19.0	21.9	33.2	29.4	48.4
	ZEV新車販売シェア	5.5%	12%	45%	45%	93%
	外航海運の天然ガスシェア	0.2%	4.6%	23%	7.5%	44%
	国際航空のバイオ燃料シェア	0.0%	1.8%	5.9%	6.9%	28%
総合効率(2022=100)						
民生	家庭	100	89.0	70.7	85.1	57.2
	業務	100	86.5	55.2	84.4	42.2
	電化率					
	家庭	28%	33%	48%	35%	57%
業務	55%	59%	71%	60%	78%	

注: 原単位は生産量当たり、総合効率はエネルギーサービス量当たりのエネルギー消費量

民生部門は、経済的な観点等から省エネルギー意識の高い産業部門とは異なり、エネルギー消費節減のインセンティブが働きにくい。そのため、エネルギー消費の削減余地が大きく、世界の家庭の総合エネルギー効率は、レファレンスシナリオと比較して、2030年で4%、2050年で19%改善する。また、業務の総合効率は、2030年では2%、2050年では24%改善する。寒冷地域における暖房・給湯機器の効率改善に加え、新興・途上国における断熱性能の向上等がエネルギー節減に大きく貢献する。国による違いはあるものの、給湯や暖房には都市ガス、液化石油ガス(LPG)、灯油などが用いられることも多いため、両用途に関しては燃料が大きく削減されうる。農村部における電化地域の拡大や近代的調理器具の普及により、エネルギー効率が悪い薪や畜ふんなどの伝統的バイオマスが最も削減される。電力も、冷房・動力・照明等、広い範囲における省エネルギー効果が使用機器の電化による増加寄与を上回り、消費が大きく減少する。

Box 4-1 | 自動車のライフサイクル分析: 国や地域に応じたパワートレインの選択を

世界におけるバッテリー電気自動車(Battery Electric Vehicle: BEV)の販売は、2024年10月の時点で、そのスピードがこれまでの急拡大と比較し減速する傾向が見受けられる。例えば欧州では、最大のEV市場であるドイツが当初予算の違憲判決を受けた歳出削減への対応としてEV補助金を2023年12月に停止、フランスも中国生産のEVを補助金の対象外としていることなどから、2024年1月～8月の欧州連合(EU)のBEV登録台数は

前年同期比で43.9%減であった。米国は「Early Adopter」と呼ばれる新しい財・サービスを初期段階で採用する消費者の購入が一巡したとの見方があり、2024年の販売見通しは前年比20%増と、2023年に記録した約40%増と比較してペースダウンが見込まれる。世界最大のEV市場である中国において2024年のBEV/PHEV販売台数は前年比25%増の見通しで、依然として拡大するものの、2022年の82%増、2023年の35%増からは減速しており、消費者の節約志向が背景要因として指摘されている。

このような中、自動車由来の温室効果ガス(GHG)排出削減に向け、液体燃料のカーボンニュートラル化の議論も進んでいる。液体燃料にバイオ燃料や水素を原料とした合成燃料(e-fuel)等カーボンニュートラル燃料の混合率を高めてゆくことで、低炭素化は実現可能である。ブラジルはバイオエタノール混合率27% (E27)を義務化しており、E100も利用可能となっている。インドネシアではバイオディーゼル混合率40% (B40)とE10の導入義務化を2025年に予定しており、タイやインドではE10以上の目標を掲げている。さらに、2023年にはインド主導でグローバル・バイオ燃料・アライアンスが発足しており、バイオ燃料の供給確保とバイオ燃料が適正な価格で、持続的に生産されることに重点が置かれている。また、2024年5月には日本とブラジルの首脳間で、持続可能燃料と高効率モビリティ機器の組み合わせとして需給両側面で脱炭素化をグローバルに推進するべく、The Initiative for Sustainable Fuels and Mobility (ISFM)の立ち上げに合意している。e-fuelはプロジェクトが南米や北欧、米国などで進んでいる。

BEVは走行時にGHG排出をしないものの、より幅広い視点で温暖化対策としての可能性と課題を読み解く必要がある。すなわち、自動車のGHG排出の推計においては、「Well to Wheel」(WtW)として自動車に使用されるエネルギーの供給(Well to Tank)から消費(Tank to Wheel)に加え、自動車の製造と廃棄を含んだライフサイクルアセスメント(LCA)を行う必要がある。また、国や地域によってカーボンニュートラル(CN)燃料の供給可能性や電源構成、エネルギーインフラストラクチャーや社会情勢は大きく異なることから、国、地域ごとのLCA分析が求められる。

乗用車のパワートレイン別LCA分析

本BOX分析では、レファレンスシナリオと技術進展シナリオを組み合わせるCN燃料促進ケースを作成し、CN燃料促進ケースと技術進展シナリオにおける、欧州先進国、東南アジア諸国連合(ASEAN)、インド、ブラジルでの乗用車1台当たりのWell to Tank、Tank to Wheel、製造時、廃棄時のGHG排出量を推計した。

表4-3 | Box分析のケース

	カーボンニュートラル燃料比率 (バイオ燃料+合成燃料)	電源構成等転換、燃料価格、燃費 等
CN燃料促進ケース	技術進展シナリオと同等	レファレンスシナリオと同等
技術進展シナリオ	技術進展シナリオ	技術進展シナリオ

注: ブラジルについてはカーボンニュートラル燃料比率をE100と想定。

実際、LCAベースのGHG排出量を見ると、各国・地域や年ごとにハイブリッド自動車(HEV)、PHEVとBEVの関係は異なる。欧州先進国は現状ではPHEVのGHG排出が最も小さく、BEVがこれとほぼ同等である。2050年時点ではCN燃料促進ケース、技術進展シナリオともにこの関係は変わらない。

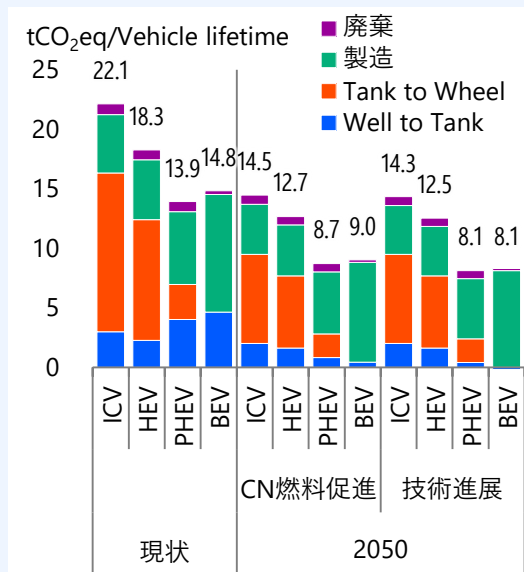
一方、電源構成の脱炭素化が相対的に遅れているASEANでは現状においてHEVとPHEVのGHG排出量は同等でBEVより小さく、インドではHEVが最も小さい。CN燃料促進ケースでは、2050年時点でも、ASEAN、インドとも、HEV、PHEVとカーボンニュートラル燃料の組み合わせが、LCAベースのGHG排出量においてBEVより低いこととなる。電源の低炭素化も進む技術進展シナリオにおいては、2050年時点でPHEVとBEVのLCAベースのGHG排出量がほぼ同等となる。

このように国・地域によって、電源構成の脱炭素化には大きな差異があるため、欧州先進国のように低炭素電源の構成比が高い国・地域では、カーボンニュートラル燃料とPHEVの組み合わせ、およびBEVにおいてLCAベースのGHG排出量が小さくなり、カーボンニュートラル達成への切り札の1つとなる。一方、電源の脱炭素化が相対的に遅れるASEANやインドでは、カーボンニュートラル燃料とPHEVの組み合わせが有力な選択肢になる。

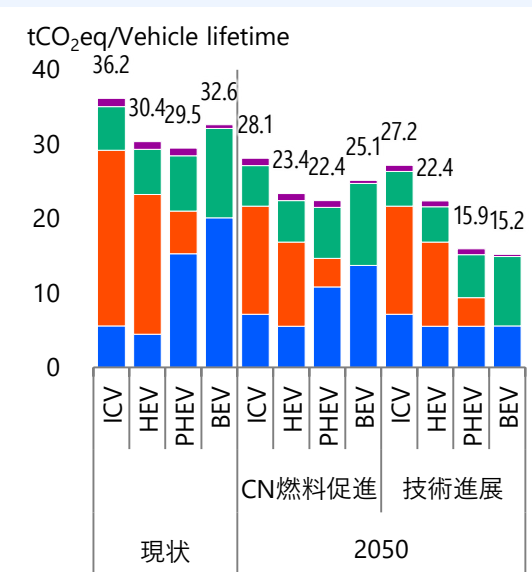
ブラジルでは、すでにE100で走行できる車両が多く、E100では現状でもHEV、PHEVのLCAベースのGHG排出量がBEVよりも小さくなっている。さらに、電源の脱炭素化が完全に進むと想定される2050年でも、HEV、PHEVともBEVと同等レベルのLCAベースのGHG排出量となると見込まれることから、バイオ燃料の供給ポテンシャルが大きいブラジルではカーボンニュートラル燃料とHEV、PHEVの組み合わせ、BEVがカーボンニュートラルに向けた対策として有力になる。

図4-2 | 乗用車の台当たりのGHG排出量(LCAベース)

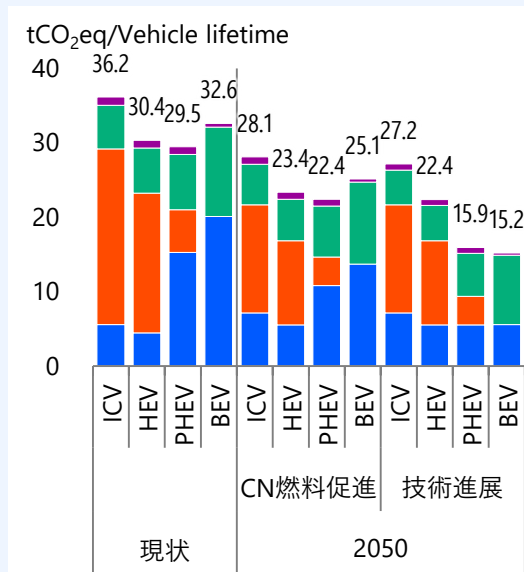
欧州先進国



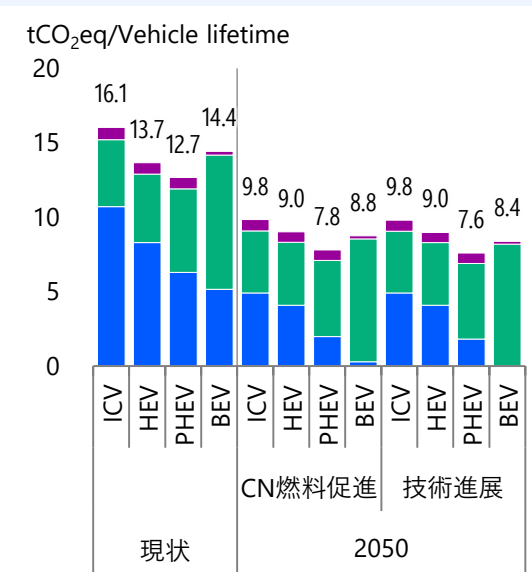
ASEAN



インド



ブラジル

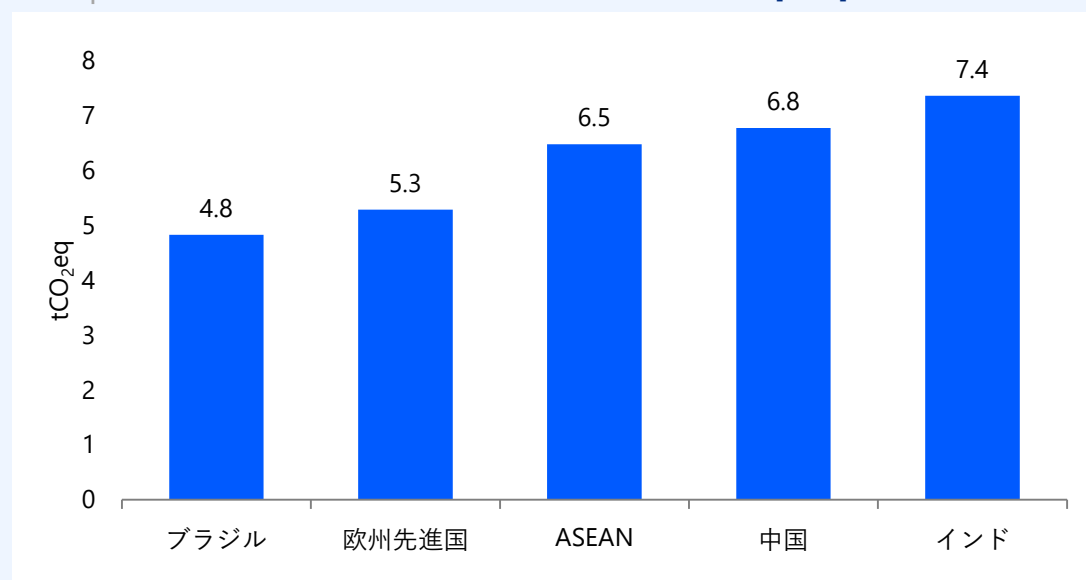


注: Well to Tankは燃料輸送時のCO₂排出は除く。乗用車の製造、廃棄は、Argonne National LaboratoryのThe Greenhouse gases, Regulated Emissions, and Energy Use in Technologies (GREET) Model 2021 versionを使用し、すべて国内または域内で行われるものと想定した。e-fuel原料のCO₂の回収効果(負の排出)は下流・利用者側(自動車使用者)に帰属するものとの前提で計算を行ったためe-fuel製造時の排出量(Well to Tank)は0。

ただし、製造時の排出量が他の部品に比して大きいバッテリーが他国で生産され輸入される場合は、LCAベースのGHG排出量が増加することにも留意が必要である。特に、ブラジルは、電源の脱炭素化がすでに進んでおり、バッテリーにおいて本分析の前提と

なっているブラジル国内での生産ではなく、電力の排出係数が相対的に大きい中国から輸入する場合は、現状においてバッテリーに係る排出量が1.4倍に増える。

図4-3 | BEVの台当たりのバッテリー製造におけるGHG排出量[現状]

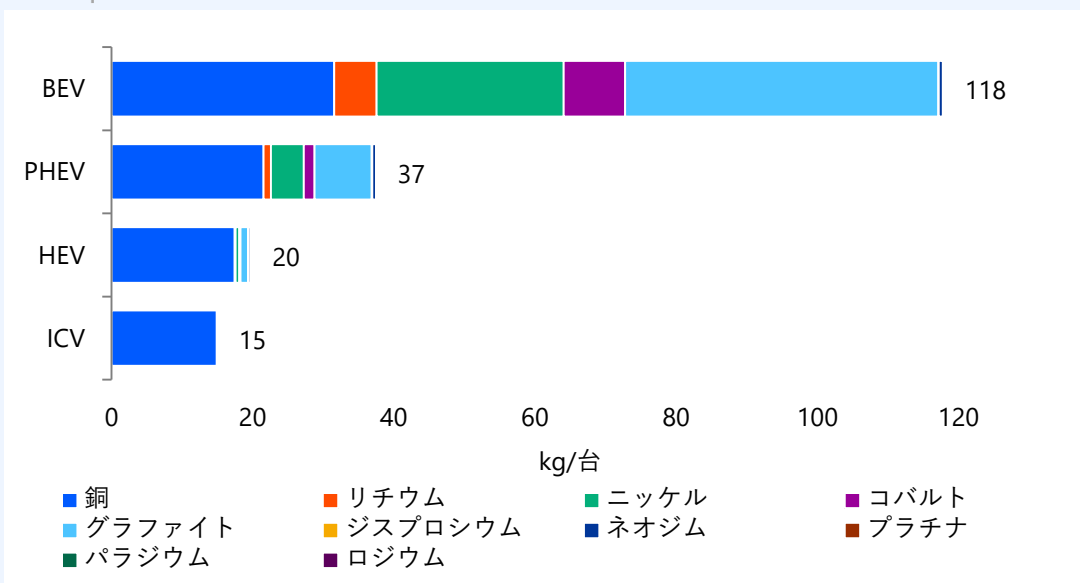


注: 図4-2の製造と対応

乗用車のパワートレイン別重要鉱物使用量

HEVやPHEVをバイオ燃料やe-fuel等のカーボンニュートラル燃料と組み合わせることの利点として、潜在的にBEVと比べて重要鉱物(クリティカルミネラル)の使用量が少なくなる優位性がある。BEVは大容量の駆動用バッテリーを搭載しており、バッテリーの原材料として、ニッケルやグラファイトなどのクリティカルミネラルを使用している。BEVにおけるクリティカルミネラルの使用量はHEVの約6倍、PHEVの約3倍であり群を抜いている(詳しくはIEEJ Outlook 2024を参照)。近年、1充電当たりの走行距離を稼ぐために搭載バッテリーの大容量化が進んでおり、このままBEVが大量に普及した場合、鉱物資源の需給バランスに支障をきたす可能性もあり、BEVの車体費用が高まるリスクもある。

図4-4 | 乗用車1台当たり鉱物使用量



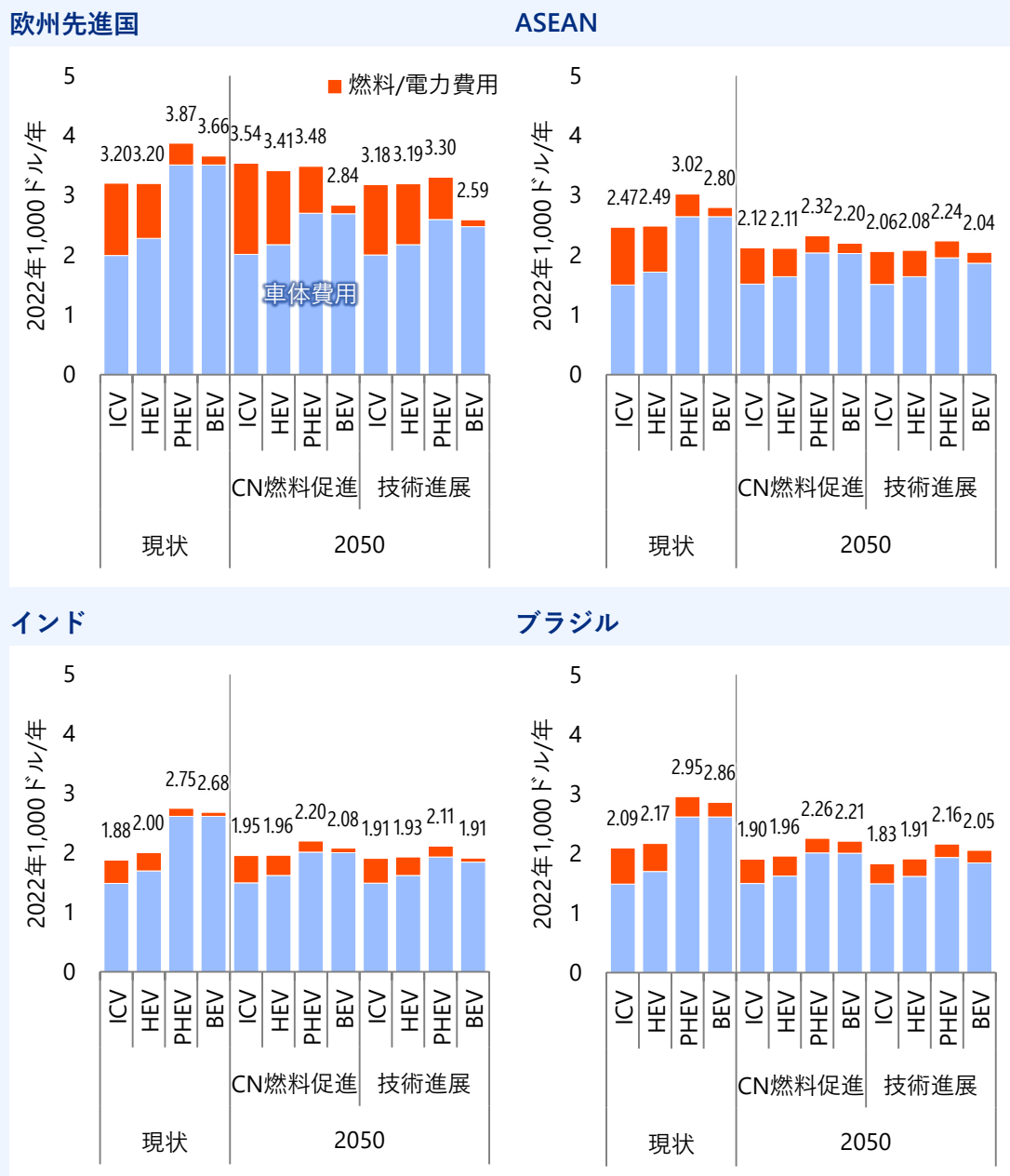
出所: エネルギー・金属鉱物資源機構¹⁴

乗用車のパワートレイン別使用費用分析

PHEV、BEVは車体費用が内燃機関自動車(ICV)やHEVよりも高価であることが現在の課題として指摘できる。そこで、バッテリー価格の将来推計を考慮した車体費用、燃料・電力の価格を2050年まで想定し、乗用車におけるパワートレイン別の使用費用を比較した。

¹⁴ エネルギー・金属鉱物資源機構(2022)『令和4年度カーボンニュートラル実現に向けた鉱物資源需給調査報告書』

図4-5 | 乗用車1台当たり使用費用



注: 車体費用は使用年数で除した値。石油、電力価格について、税制、補助金等は変化しないと想定。バイオ燃料は2023年の石油との比率で一定と想定し、ブラジルは既存の補助金が続く想定。合成燃料は2050年の日本の海外で製造するケースの価格¥300/Lと想定し、日本の石油との比率で他国も適用。

欧州先進国は現状ではICV、HEVがPHEV、BEVよりも使用費用が安価である。これが、2050年ではBEVの車体費用が低下することに加え、石油価格が電力価格に比して高くなる(電力価格がガソリンと比較して低い)ことから、BEVが最も安価となる。ASEANやインド、ブラジル等非経済協力開発機構(OECD)諸国も現状では同様に、ICV、HEV

がPHEV、BEVよりも安価である。2050年でPHEVやBEVの車体費用が低下する場合であっても、ASEANやインドは石油価格が欧州先進国と比較して低いことから、CN燃料促進ケースではパワートレイン別の使用費用でHEVはBEVのそれを下回り、技術進展シナリオでは同等となることも想定される。ブラジルはバイオ燃料価格が低いことから、技術進展シナリオでもそれを下回る。すなわち、車体費用に加えて、石油価格やカーボンニュートラル燃料価格、電力価格が消費者のパワートレイン選択に大きく影響を与えることとなる¹⁵。

インプリケーション

世界の気温上昇を1.5°C上昇に抑制するためには、全体的(holistic)で、柔軟性(flexible)のあるアプローチが求められる。その際、自動車のカーボンニュートラル化に向けては、資源の賦存や国の発展段階と消費者の購買力、自動車利用に関わる燃料・電力価格、そして電源の脱炭素化などさまざまな地域性を考慮する必要がある。

LCA分析の結果が示すように、パワートレインの使用時のみならず、エネルギーの生産や乗用車の製造・廃棄に関わるGHG排出も考慮する場合、地域性によってその評価が大きく異なる。欧州先進国のように低炭素電源の構成比が高い場合、BEVに並んで、カーボンニュートラル燃料とPHEVの組み合わせのGHG排出量が小さくなる。一方、電源の脱炭素化が相対的に遅れるASEANやインドではカーボンニュートラル燃料とPHEVの組み合わせが、バイオ燃料の豊富なブラジルではカーボンニュートラル燃料とHEV、PHEVの組み合わせが、それぞれ自動車のカーボンニュートラル化に向けた有力な選択肢となる。

加えて、LCA分析の結果が示すとおり、すでに電力部門の脱炭素化が進展するブラジルにおいて、電力の排出係数がより高い国で製造されたバッテリーを輸入した場合、バッテリーに関連する排出量はブラジル国内での製造と比較して、最大で40%増加する可能性がある。すなわち、LCAとして、使用段階、廃棄段階の排出量評価に加えて、国内お

¹⁵ BEVは走行距離と使用年数に応じて、バッテリー交換の必要がある。また、これは寒冷地において顕著となる。さらに、BEVの普及割合が増えた場合、どのようにパワートレイン間で公正な形で税を負担し、道路整備費用等をまかなうかといった検討が求められる。加えて、消費者の使用費用以外に、発電設備容量・送配電システムの形成等、社会的な負担も考慮する必要がある。バッテリー価格について本分析では、世界共通としているが、リン酸鉄リチウム電池で生産国において価格が大きく異なること(中国製よりも米国の場合は10%程度高く、欧州の場合は20%高額)との試算がある。このようにBEVの車両価格に大きく影響するバッテリー価格についても、生産国によって異なることや、将来の技術進展等も踏まえた本分析以外での検討項目がある点には留意が必要である。

よび第三国でのバッテリー製造を考慮したうえでのパワートレイン別のGHG排出の評価が求められる。

重要鉱物の供給は、現在中国など特定国による寡占状況となっており、カーボンニュートラル燃料とHEV、PHEVとの組み合わせは、重要鉱物への依存が大きくなるBEVに比して安全保障上のメリットが大きいことも重要なインプリケーションの一つであろう。

自動車のカーボンニュートラル化に向け、その手段が「Affordable: 手頃な価格」で実施可能か、については消費者負担の観点から特に新興・途上国において重要である。例えば、ASEANやインド、ブラジルの分析で提示したとおり、バイオ燃料等のカーボンニュートラル燃料の利用を踏まえたHEVの利用が、2050年においても「Affordable」な選択肢となりうる可能性がある。今後も、重要鉱物資源の需給バランスや技術開発のバッテリー価格への影響を踏まえた車体費用の見通しに加えて、将来にわたっての石油価格やカーボンニュートラル燃料価格、電力価格の相対関係に影響する制度(税制や助成措置等)の綿密な検討が求められる。

再生可能エネルギー

技術進展シナリオでは、自然変動電源である風力発電や太陽光発電の市場導入がさらに加速する。世界の総発電量に占める自然変動電源のシェアは2022年の11.7%から2050年には53.1%まで上昇する。

この水準まで自然変動電源のシェアが高まると、一部の国やエリアでは電力システム運用上の課題が顕在化する可能性が高い。例えば、風力・太陽光電力の時間変動性に起因する課題として、急激な発電出力変動(周波数変動)や余剰電力、年に1回～2回程度発生するとされる「曇天無風期間」などがある。また、空間偏在性に起因する課題として送電容量不足がある。さらには、その他の課題として非同期電源¹⁶の増加にともなう系統慣性低下や立地周辺の自然環境・生態系・経済活動への影響(大規模太陽光発電設置のための森林開発や陸上風力発電機による鳥類への影響、洋上風力発電が漁業に及ぼす影響の深刻化等)もある。

これらの課題を踏まえて、自然変動電源を電力システムに統合するための技術的・制度的・政策的な対策が必要となる。ここで提示する技術進展シナリオにおいては、自然変動電源の統合技術の実用化進展や、その社会実装への政策的支援、事業者・投資家・消費者の環境意

¹⁶ 同期電源とは、自らが回転エネルギーを持つことで、タービンが回転し続ける力である慣性力や発電機同士が同速度で回ろうとする力である同期化力を有し、電力系統の安定化に資する機能がある電源。火力発電、水力発電、原子力発電など。これに対し、非同期電源(インバータ電源)とは、そうした機能がない電源。太陽光発電、風力発電など。