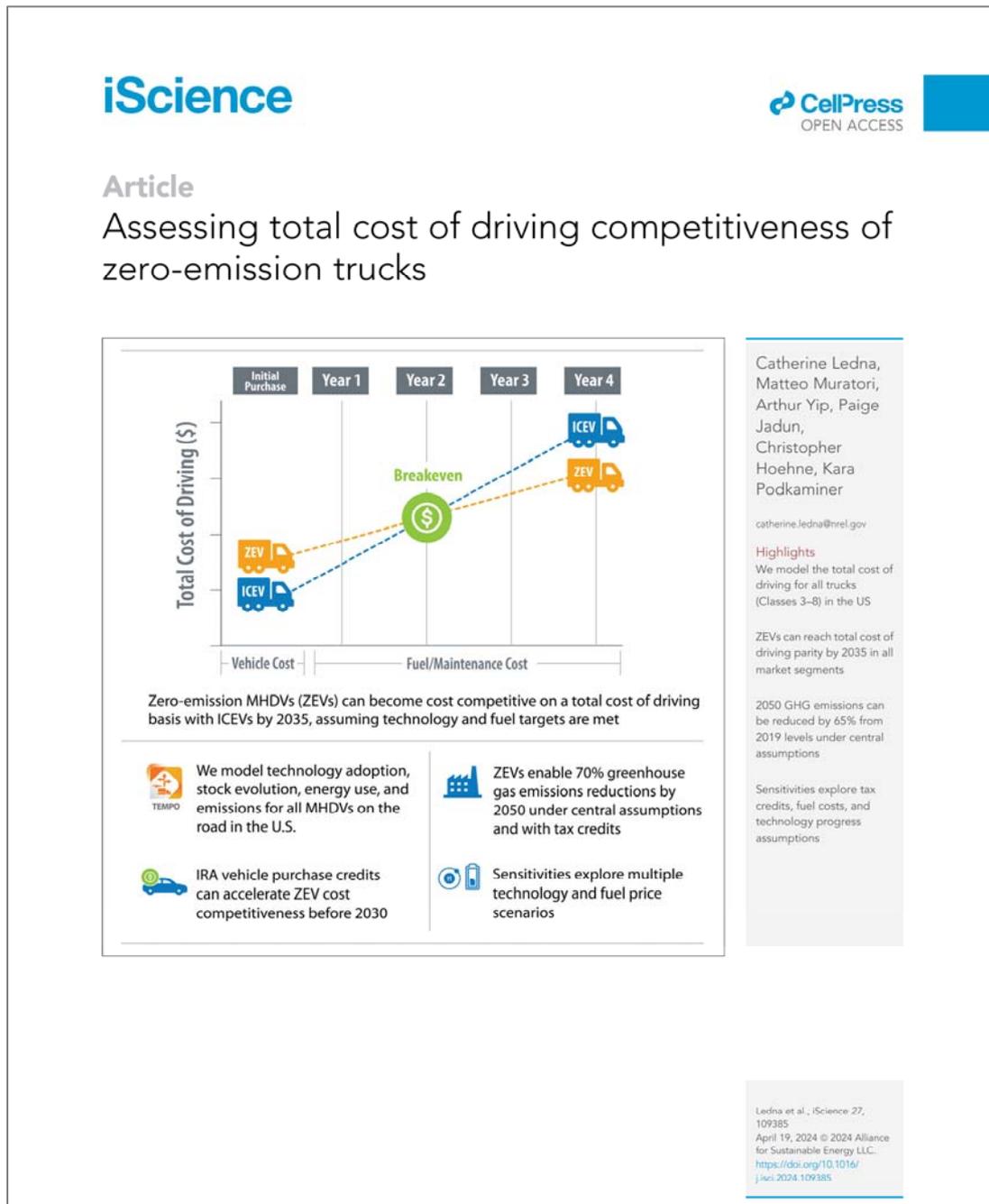


■海外情報

★ゼロエミッショントラックの競争力を高めるためのトータルコストの評価 (Assessing total cost of driving competitiveness of zero-emission trucks)



Catherine Ledna,^{1,3,*} Matteo Muratori,¹ Arthur Yip,¹ Paige Jadoon,¹ Christopher Hoen,¹ and Cara Padakaminr²

1 再生可能エネルギー研究所, Golden, CO, USA (米国コロラド州ゴールデン)

2 米国エネルギー省、ワシントン DC、米国

3 メイン著者

※連絡先: catherine.ledna@nrel.gov <https://doi.org/10.1016/j.isci.2024.109385>

出典: <https://www.nrel.gov/docs/fy24osti/86401.pdf>

概要

中型および大型車は、米国の運輸分野における温室効果ガス(GHG)排出量の 21%を占め、大気汚染の主要な原因となっている。バッテリー電気自動車や水素燃料電池電気自動車(EV、FCEV)などのゼロエミッション車(ZEV)の TCD(総運行コスト：Total Cost of Driving)が、代替エネルギー導入シナリオの下でどのように変化するかを調べた。車両と燃料の継続的な改善により、ZEV は急速に実用化が進み、2035 年までにすべての市場分野でディーゼル車と同等またはそれを上回る TCD に達する可能性がある。大型長距離トラックの場合、EV は充電コストが 0.18 ドル/kWh 未満になれば TCD ベースで競争力を発揮し、FCEV は水素コストが 5 ドル/kg 未満になれば TCD ベースで競争力を持つようになる。2035 年までに ZEV 販売に完全に移行すると、これは支援政策がなかった 2019 年と比較して 2050 年までに 65%の排出量削減が達成される。インフレ抑制法(Inflation Reduction Act)の車両購入クレジットなどのインセンティブにより、ZEV の TCD の競争力はさらに加速し、今後 5 年間で大きな実用化が見込まれる。

はじめに

中型および大型車(MHDV)は、さまざまな用途に使用される車両総重量規格(GVWR)が 10,000 ポンド(約 4.5 トン)を超える自動車交通用車両であり、米国の道路を走行する車両の 5%であるが、米国の運輸分野における温室効果ガス(GHG)排出量の 21%を占めており、将来は小型車の成長を上回ると予想されている。¹⁻³ MHDV の GHG 排出量削減は、気候変動の緩和と地域の大気質改善の取り組みの両方にとって重要な優先事項となっている。ZEV には、EV や FCEV など、テールパイプからの排出ガスのない車両が含まれ、これらの目標を達成するための主要なソリューションとして認識されている。^{1,4,5} 提案あるいは発表されている政策措置には、大気質と GHG 排出基準の強化、ZEV 購入補助金、研究開発への投資、インフラの導入などがある。^{6,7} 例えば、インフレ抑制法(IRA)には、EV や FCEV を含む適切なクリーン自動車の購入に対して最大 40,000 ドルの税額控除が含まれており、インフラに対するインセンティブも盛り込まれている。⁸ 最近では、米国環境保護庁(EPA)が、2027 年から 2032 年モデルの MHDV に対する GHG 排出規制をより厳格にすることを提案している。⁹ 我々は、ゼロエミッション EV と FCEV の総走行コストが、将来の技術進歩と燃料コストの代替エネルギー導入シナリオの下でどのように変化するかを推定するための包括的なモデルを提示する。これらの考察を使用して、すべての車両クラスで ZEV の導入がどのように進展するかを探り、運送事業者の売上高とエネルギー消費を計算し、複数の技術、燃料、および政策の感度を評価して、すべての MHDV ゼロエミッション車に関する議論に資する情報を提供する。

これまでのところ、ZEV が既存の MHDV に占める割合はわずかであり(2022 年現在、米国ではバスを除き約 3,100 台¹⁰)、購入コストが高いこと、充電または燃料補給インフラの不足、運送事業改革など物流上の課題等、短期的な障壁に直面している。^{11,12} しかし、最近の技術進歩と、官民の興味により脱炭素輸送対応への投資が促進されたことにより、EV は急速に実用可能なソリューションになりつつある。^{10, 13, 14} FCEV は、車両購入インセンティブを考慮しても、MHDV のアプリケーションとしてはまだ競争力はないが、長距離運行や多用途アプリケーションなど、電化が困難な市場分野に費用対効果の高いソリューションを提供できる可能性がある。¹⁵ MHDV には、技術的および経済的要件が異なる多くの異なる市場分野があり、その結果として、ゼロエミッション技術のコスト競争力に違いが生じている。米国の運送事業用 MHDV には、GVWR が 10,000 ポンド(約 4.5 トン)から 33,000 ポンド(約 15 トン)を超える車両、年間 10,000 マイル(約 16,000km)未満から年間 200,000 マイル(約 320,000km)を超える車両があり、さまざまな貨物や貨物以外のアプリケ

ーションに対応している。図 1 は、2019 年における米国の運送事業用 MHDV 全体の車両保有台数、走行距離(VMT : vehicle-miles traveled)、エネルギーおよび GHG 排出量の分布をまとめたもので、バスを除く GVWR が 10,000 ポンドを超えるすべての貨物および非貨物 MHDV を考慮している。^{3,16~18} 大型トラック(クラス 7~8、GVWR が 26,000 ポンド以上)は、MHDV の総保有台数の 43%であるが、VMT の 63%、エネルギー使用量と GHG 排出量の 74%を占めており、長距離トラックは排出量に対して相対的に大きな割合を占めている。中型車(クラス 3~6、または GVWR が 10,000~26,000 ポンド)は、運行が少なく、燃料効率が高い傾向があるため、排出量は保有台数のシェアよりも相対的に低くなる。保有台数と排出ガスシェアの大きな違いは、車両のサイズと年間走行距離により、高い ZEV 販売または保有台数シェアは GHG 排出削減に比例しない可能性があることが示唆される。この運送事業用 MHDV の不均一性は、総運転コストベースで内燃機関車(ICEV)およびハイブリッド電気自動車(HEV)との ZEV 競争力にも影響を及ぼし、車両設計(車両航続距離、出力、重量要件を含む)とインフラのニーズ(EV の低速または急速充電、EV および FCEV のローカルまたは地域の燃料補給ネットワーク)を最適化するためのさまざまな要件や機会に影響する。

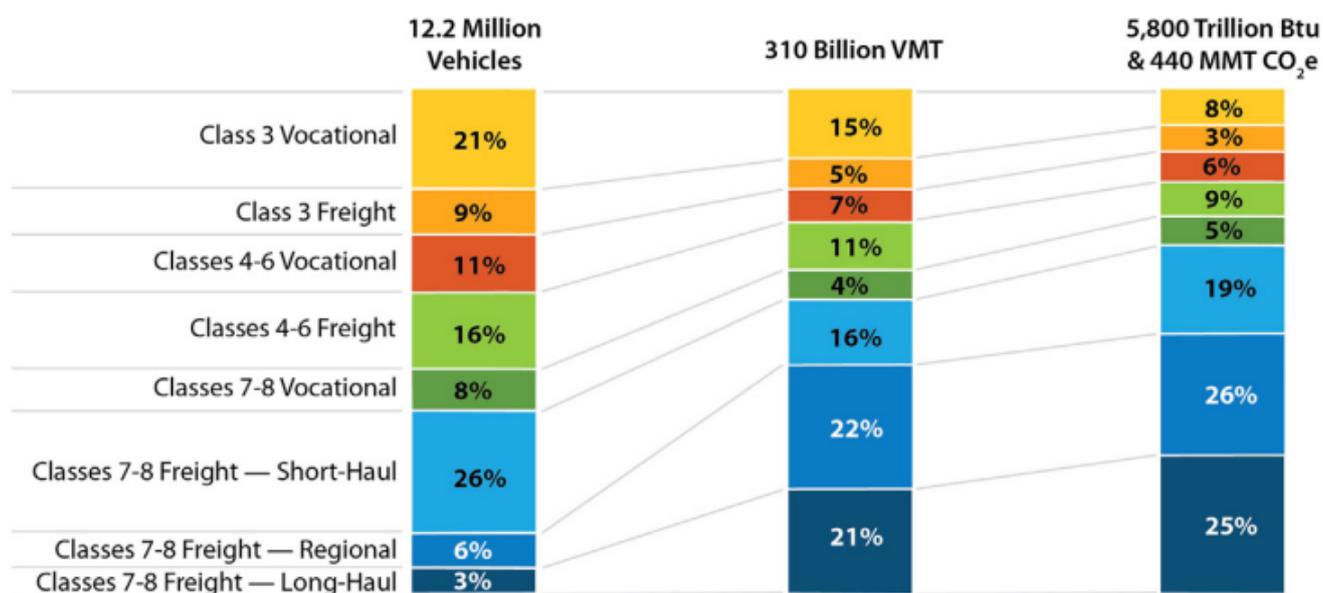


図 1. 2019 年の MHDV 車両保有台数、VMT、エネルギー使用量・GHG 排出量のシェアを車両クラス別、用途別に比較

Annual Energy Outlook、Freight Analysis Framework、および 2002 Vehicle Inventory and Use Survey のデータに基づく。¹⁶⁻¹⁸ さまざまな車両クラスを色で区別し、それぞれのクラスの色合いは運用分野を示しており、明るい色合いは、短距離の運用分野を示す。大型の車両(クラス 7~8 の大型トラック)は、走行距離が長く、燃費が低くなる傾向があり、その結果、エネルギー需要および GHG 排出量は不釣り合いになっている。

将来の技術動向の予測は複雑で、多くの要因が消費者の意思決定に影響を与えるが、経済性はビジネス用途における技術選択の重要な決定要因である。過去の研究では、米国および国際的な環境における特定の車両クラスとアプリケーションに対するゼロエミッション技術の競争力を、総所有コスト(TCO)または総運転コスト(TCD)の指標を使用して評価してきた。どちらの指標も、車両の初期費用と経常的な運行コスト(燃料費とメンテナンス費用を含む)を一定期間にわたった節減を考

慮しており、通常の評価は車両の所有期間や寿命よりも短い(つまり、車両運用の最初の数年間の財務実績を比較)。TCO は、ドライバーの賃金、保険、TCD によって節約された中古販売または価値上昇などの運行コストを追加で考慮する場合がある。積載量の制限によるコストや燃料補給に費やされた時間などの他のコストは、研究内容に応じてこれらのフレームワークに組み込まれる場合がある。一般的に、コスト分析は将来の技術動向や不確実である燃料コスト予測など、入力情報の仮定に非常に左右されるが、複数の研究により、ZEV 技術は、2030 年から 2040 年の間に一部またはすべてのクラスおよび市場分野でディーゼル車と TCO または TCD ベースでコスト競争力を持つようになることがわかっている。Hunter¹⁵ は、米国の中型および大型トラックの従来型、ハイブリッド、および ZEV 技術の TCO を推定しており、EV は積載重量の制約がない単一シフト業務で 2050 年より前に従来型およびハイブリッド技術と競争力を持つことができるのに対し、FCEV は 2050 年より前にマルチシフトの積載重量に制約がある運用で競争力を高めることができることがわかった。ITF¹⁹ と Tanco²⁰ は、欧州とラテンアメリカの環境において、それぞれ TCO ベースで ZEV のコスト競争力を評価し、2030 年から 2050 年までの複数の車両クラスと市場分野、特に軽量の短距離車両において TCO 競争力があることを見いだした。他の分析では、TCO の競争力は早期に達成できることがわかった(いずれも Phadke²¹)。ICCT^{22,23} は、米国において EV がクラス 8 の長距離用途において、2030 年またはそれ以前に従来車と同等の TCO を達成できると結論付けている。(Moultak²³ ら)。²³ また、FCEV もこのタイムスケールで同等の TCO を達成できることを明らかにしている。Burke²⁴ は、EV と FCEV が長距離および短距離の用途において 2030 年までに ICEV と同等の TCO に近づくことができることを見いだした。一般的に、これらの分析は、軽量車両クラスの ZEV は、より重いクラスよりも早く(2030 年以前)従来車およびハイブリッド車で TCO または TCD 競争力を達成する可能性が高く、EV はこれらのクラスで最も競争力のある技術であることを示唆している。FCEV の競争力は、水素のコストと競合する EV 技術に関する仮定に大きく依存することがわかっている。Hunter¹⁵ は、再充電に費やす時間が長く機会損失が大きい市場分野(長距離運転など)において、燃料電池がより大きな可能性を持つことを示している。他の研究では、コスト競争力を考慮しないときの、運送事業の運用特性に基づいた電動化の可能性を評価している。Lund²⁵ は、既存の走行サイクルでの分析を行い、カリフォルニア州とニューヨーク州の MHDV を用いた運送事業のかなりの部分(中型トラックの 65%、大型トラックの 50%)で、現在、電動化が実現可能であることがわかった。Liimatainen²⁶ および Cabukoglu²⁷ はまた、欧州の状況における MHDV を用いた運送事業の電化の可能性を評価している。この知見では、短期的には電動化は、積載量の制約や日々の長距離移動の制約の可能性はあるが、特に中型トラックでは高い可能性のあることを示した。欧州では、Earl²⁸ と Ainalis²⁹ は、EV は効率が高く、燃料費と保守費用低減が大きいいため長距離輸送に適しており、FCEV よりも競争力が高い可能性のあることを示している。最近の多くの研究では、一つ以上の市場分野における ZEV の経済的競争力と技術的実現可能性が評価されているが、これまでのところ、車両の TCD 競争力、実用性、エネルギー消費、および運送事業の売上高を、すべての MHDV 用途にわたる全体的なフレームワークで検討した研究はほとんどない。Moultak²³ らは²³ 米国、欧州、中国における EV と FCEV の普及率の変化がエネルギーと排出ガスに与える影響を、運送事業の売上高モデルを用いて評価しているが、コストやその他の要因に基づいて内因的に計算するのではなく、外因的に決められた導入の道筋を使用している。Ledna³ は、米国の運送事業用 MHDV の初期の全体的なフレームワークを提示し、ZEV がすべての市場分野で 2035 年までに TCD パリティを達成できること、およびその前提条件下では運送事業の売り上げを加速することなく大幅な排出削減が達成できることを見いだした。この研究は、

Ledna らによって、追加の感度分析を含む前提条件の更新により、2022 年の IRA の車両購入クレジットの影響を含むように分析を拡大している。本研究では、現在から 2050 年までの米国の MHDV の市場分野全体における ZEV 市場導入率、エネルギー消費、排出削減ポテンシャルを経済的な観点から評価する。我々の分析は、2002 年の車両インベントリおよび利用調査(VIUS)¹⁸と貨物分析フレームワーク(FAF)¹⁷を統合し、セグメント間の日次および年次 VMT の違いを含む米国固有の運用特性を把握している。我々は、分野全体の交通エネルギーシステムモデルである TEMPO(Transportation Energy & Mobility Pathway Options)モデル³⁰を使用して、すべての MHDV 技術の総運行コスト、新車購入、投資効率、車両活動量、およびその結果としてのエネルギー消費と GHG 排出量を推定する。我々の分析は、車両の使用とエネルギー消費におけるさまざまな MHDV 市場分野の違いを独自に捉えている。2022 年の IRA MHDV 商用車税額控除(条項 45W)の影響を含む、技術コストと進捗感度、燃料コスト、政策など、さまざまなシナリオを検討し、TCD の競争力への影響に重きを置いた。インフラや製造上の制約など、実際の ZEV 販売を減少または遅延させる可能性のあるその他の要因については、ここでは説明しない。我々の分析は、次の疑問に答えることを目的としている。

表 1. TCD 計算で使用される主な前提条件、主要シナリオ

Table 1. Key assumptions used in TCD calculations, Central scenario					
Parameter	パラメーター	2025	2030	2035	2050
Battery Cost (\$/kWh)	バッテリーコスト (\$/kWh)	217	139	80	50
Battery Energy Density (Wh/kg)	バッテリーエネルギー密度 (Wh/kg)	196	223	250	380
Fuel Cell Cost (\$/kW)	燃料電池コスト (\$/kW)	175	129	80	60
Fuel Cell Specific Power (W/kg)	燃料電池比出力 (W/kg)	973	1009	1040	1080
Depot Charging Cost (\$/kWh) ^a	車庫での充電コスト (\$/kWh)	0.21	0.18	0.17	0.16
Corridor Charging Cost (\$/kWh) ^a	経路での充電コスト (\$/kWh)	0.36	0.28	0.26	0.24
Hydrogen Cost (\$/kg) ^a	水素のコスト (\$/kg)	9.00	6.00	4.00	4.00
Diesel Price (\$/gallon)	軽油のコスト (\$/ガロン)	3.99	3.65	3.74	3.92
Annual VMT	年間の車両走行距離	Varies with vehicle class and market application; see Table S1.1 of the supplemental information 車両クラスや市場用途により異なる。補足情報表S1.1参照			
Time Horizon used in TCD	総運行コストの時間軸	3 years (Class 3), 4 years (Classes 4–6) or 5 years (Classes 7–8)			
Discount Rate (%)	割引率	7			
Opportunity Cost of En-Route Charging Time (\$/hour)	経路充電での機会コスト (\$/hour)	75			
EV Recharging Infrastructure	EV充電インフラ	Progressively available with EV adoption; no infrastructure limitations on adoption			
EV Corridor Charging Speed	EV経路充電速度	350 kW (Class 3) or 500 kW (Classes 4–8)			
Hydrogen Refueling Infrastructure	水素充填インフラ	Progressively available with FCEV adoption; no infrastructure limitations on adoption FCEV普及に伴い段階的に利用可能;インフラ普及の制限なし			
Policy	政策	車両購入補助あるいは他の政策支援想定無 No vehicle purchase subsidies or other supportive policies are assumed			

Vehicle purchase cost and fuel economy specifications are based on simulations conducted by Argonne National Laboratory,³¹ consistent with the component characteristics listed in Table 1. Diesel fuel prices are from the Annual Energy Outlook (AEO), 2023 edition,² while depot and corridor charging costs are estimated inclusive of station cost and utilization.³² Hydrogen costs are based on DOE targets and implicitly include investments and incentives.³³ These and other assumptions are described in more detail in the STAR Methods and supplemental information sections.

^aInclusive of fuel cost and recharging/refueling infrastructure.

車両の購入コストと燃費の仕様は、アルゴンヌ国立研究所³¹が実施したシミュレーションに基づき、表 1 に記載した構成部品の特性と一致している。ディーゼル燃料価格は、Annual Energy Outlook (AEO) 2023 年版²による。一方、車庫と経路(回廊)の充電コストは、ステーションのコストと利用率を含めて見積もられている。³²水素コストは、DOE の目標値に基づき、投資とインセンティブを含んでいる。³³これらおよびその他の前提条件については、STAR の方法と補足情報のセクションで詳しく説明している。

^a 燃料コストおよび充電、燃料補給インフラを含む

- (1) 米国エネルギー省 (DOE) が開発した技術と燃料の進歩の道筋 (STAR メソッドのセクションで詳しく説明) に基づいて、MHDV の短期的 (2030) および長期的 (2050) の ZEV 導入の可能性はどの程度か?
- (2) 技術や燃料の進歩を取り巻く感度は、ZEV の導入や排出削減にどのように影響するか?
- (3) ZEV の導入可能性と排出削減量は、MHDV 市場分野間でどのように異なるか?
- (4) IRA の条項 45W 税額控除は、短期的に MHDV TCD の競争力と潜在的な排出削減にどのように影響するか?

我々の調査結果は、DOE および業界が設定した目標に沿って、車両および燃料に関する技術の継続的な進歩により、ZEV は 2035 年までに米国のすべての市場分野で従来のディーゼル技術とハイブリッドディーゼル技術と同等に達することができることを示している。技術と燃料に関する感度、特に EV と FCEV のトレードオフには大きなばらつきがあることが分かる。設定した前提条件において IRA 税額控除がない状態で、ZEV は車両運用の最初の数年間で車両購入コストと運行コスト削減が加わった結果、2030 年までには、MHDV の全販売台数の 38% で最も低コストの技術になる。IRA の車両購入インセンティブは、従来車よりも安い ZEV の販売シェアを大幅に増加させることができる(製造やインフラの制約がないと仮定すると、2030 年までに 80% 以上になる)。設定した前提条件の下での全体的な排出削減量は、車両保有台数の入れ替えに時間がかかるという制限を加味すると、2019 年比で 2050 年までにおよそ 65%、IRA 購入クレジットを加味するとおよそ 70% である。排出量への影響も、感度によって大きく異なる。

結 果

主要シナリオでわかったこと

まず、従来の MHDV 技術、ハイブリッド技術、およびゼロエミッション MHDV 技術の TCD 競争力を設定した前提条件の下で評価する(表 1 を参照)。中心となる技術の前提条件は、米国エネルギー省の EV および FCEV テクノロジーに関する高度な技術進歩シナリオに基づいており (Islam ら³¹ により論文となっている)、業界の審査を受けている。なお、IRA などの支援的政策は除外されている。また、ZEV ならびに従来の技術および燃料に関し前提条件を変えた 10 の追加シナリオも検討する(次のセクションを参照)。さまざまな技術オプションの競争力を評価するために、3 年から 5 年の時間軸で、車両購入コスト、燃料コスト (EV および FCEV のインフラの平準化コストを含む)、メンテナンスコスト、および充電時間 (EV の収益化コスト) を考慮して TCD を算出する。パワートレインは、従来型ディーゼル ICEV、パラレルハイブリッド自動車 (HEV)、EV (150 マイル、300 マイル、500 マイルの 3 つの航続距離)、FCEV の 4 つを検討する。この分析では、プラグインハイブリッド自動車 (PHEV) は考慮しない。車両クラス 3~8 (10,000 ポンド以上) と、バスを除く米国の MHDV の全運行範囲をカバーする市場分野を考慮する。

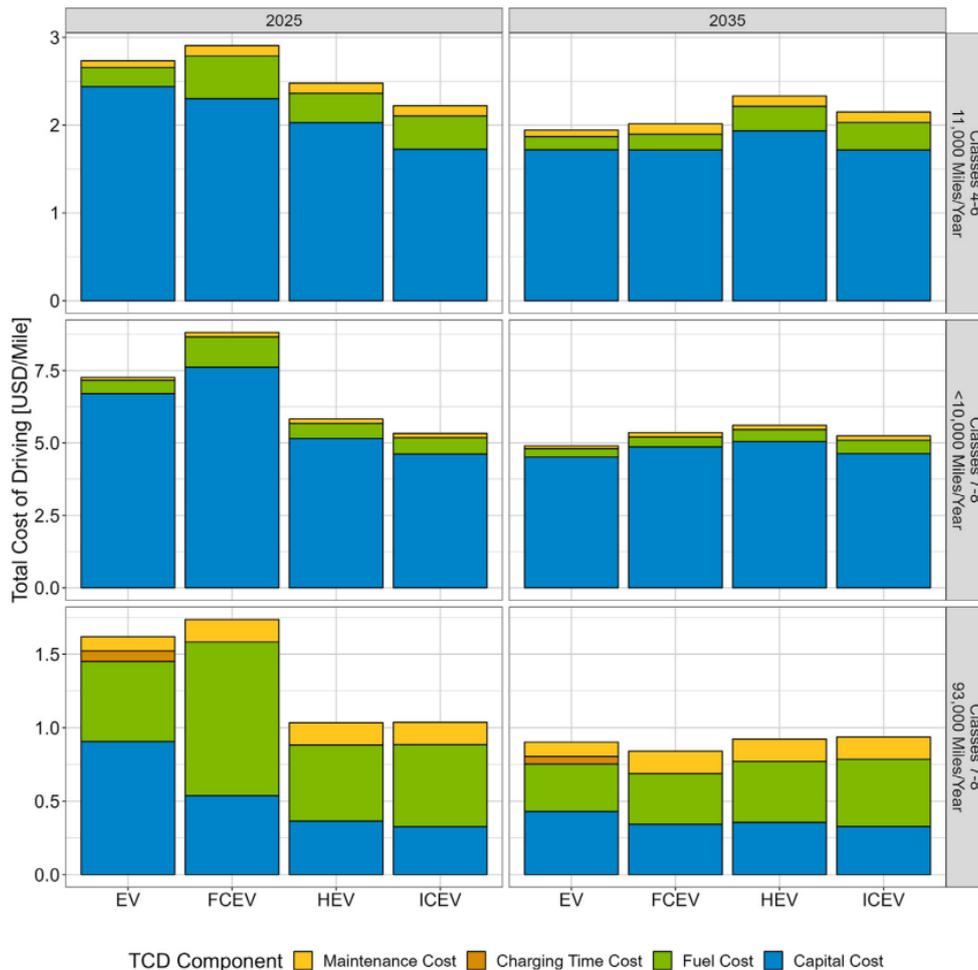


図 2. 主要シナリオにおけるいくつかの中型および大型車市場分野の総運転コスト

図 2 は、さまざまな車両技術といくつかの市場分野における中心的な前提条件で比較したものである。短距離用途(小型・中型・中型[クラス 3-6]の大半で、エネルギーと排出ガスの割合はわずか)では、資本コストが TCD の最大の要素であり、重量車(クラス 7-8)の長距離用途では燃料コストが最大の要素となっている。EV は効率が最も高く、メンテナンスコストが最も低いため、高い VMT アプリケーション(長距離など)ではコスト削減が拡大するが、航続距離の制約とルート中の充電時間の機会費用(ここでは \$75/h としている。機会費用の見積もり方法の詳細については、補足情報のセクション S3 を参照)により、トレードオフが発生する可能性がある。図 S5.1 は、すべてのシミュレーション年におけるこれらの車両技術の TCD を示している。

図 3 は、ZEV がディーゼル車(ICEV と HEV の両方を含む)に対して TCD ベースで競争力を持つようになる時間軸をプロットしたものである。一般的には、資本コスト、運行コスト、VMT の相互作用により、ZEV 技術がパリティを達成するタイミングが決まる。2032 年までに(多くの場合 2030 年より前)、ZEV はバッテリーコストの低下により、小型・中型(クラス 3)および中型(クラス 4~6)のトラッククラスでディーゼル車と同等の TCD を達成する。航続距離が 150~300 マイルの短距離 EV は日々の VMT が短く、より大型で高コストバッテリーを搭載した EV の必要性が少ない短距離

用途と地域における用途で同等になる。大型トラック(クラス7~8)や、より長距離(500マイル超の運行距離)を走行するトラックは、2030年以降に同等になる。これらの市場分野では、FCEVはEVよりも早くコストパリティを達成しているが、これは燃料補給時間の機会費用損失によるペナルティを受けないことに起因している。EVの場合、ルート上の充電に費やす時間は、毎日の走行距離、充電速度、車両航続距離によって異なる。航続距離が500マイル、充電速度が500kWの長距離クラス7~8のEVは、シフトごとに燃料補給は10分から2時間費やすと推定されている(1日の走行距離とバッテリーサイズによって異なる)。この時間の機会費用は、\$75/hに相当する(Hunterら¹⁵)。すべての車両アプリケーションにおいて、少なくとも一つのZEV技術が2035年までにディーゼルと同等になることがわかっている。ZEV技術のGHG排出削減ポテンシャルは、2019年におけるテールパイプGHG排出量として定義され、長距離アプリケーションで使われる大型トラックで最も多くなる。一般的に大型トラックは、小型・中型・中型トラックよりも燃費が悪く、VMTが大きい傾向があるため、排出ガス削減ポテンシャルが最も大きくなっている。主要シナリオでは、ZEVは2034年までにこれらの分野で同等になることがわかった。短期的(2030年)には、最も大きい効果を発揮するのは、短距離で運行するクラス3トラックにEVを導入することである。

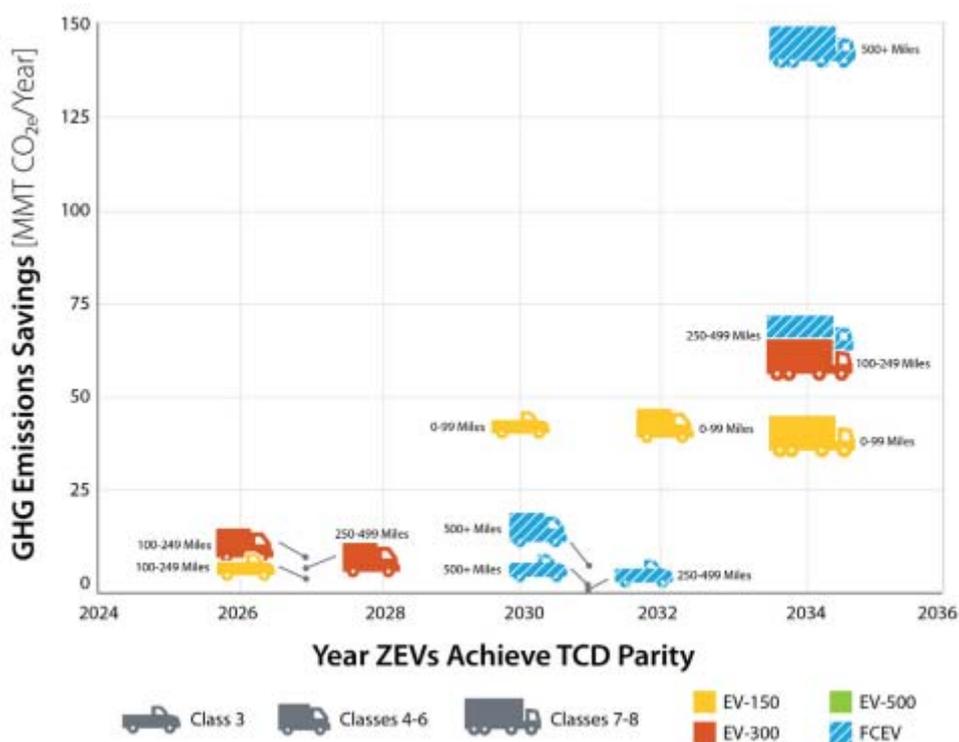


図 3. TCD パリティと GHG 排出削減の可能性:MHDV クラス別、市場分野別、主要シナリオ

EVのシンボル(EV-150、EV-300、EV-500)は、EVの航続距離をマイル単位で表している。マイルラベル(0~99マイル、100~249マイルなど)は、市場における主な運行距離を示している。GHG排出削減ポテンシャルは、2019年におけるテールパイプCO_{2e}排出量から車両クラス別、運行距離別に推計し、セグメント全体がゼロエミッション化した場合の排出削減量を示している。TCDパリティは、車両購入コストと、運用開始から3~5年間の燃料費とメンテナンスコストを考慮して計算される。色あいは、従来技術と最初にTCD同等を達成したゼロエミッション技術を指す。他のゼロエミッション技術は、その後TCDパリティに達し、コスト競争力を持つようになる可能性があるが、示されていない。たとえば、長距離分野(500+マイルの運行距離)の大型車のEV-500は示されていないが、2035年(500~1000マイルの運行距離)と2045年(1000+マイルの運行距離)の間でTCDパリティを達成している。

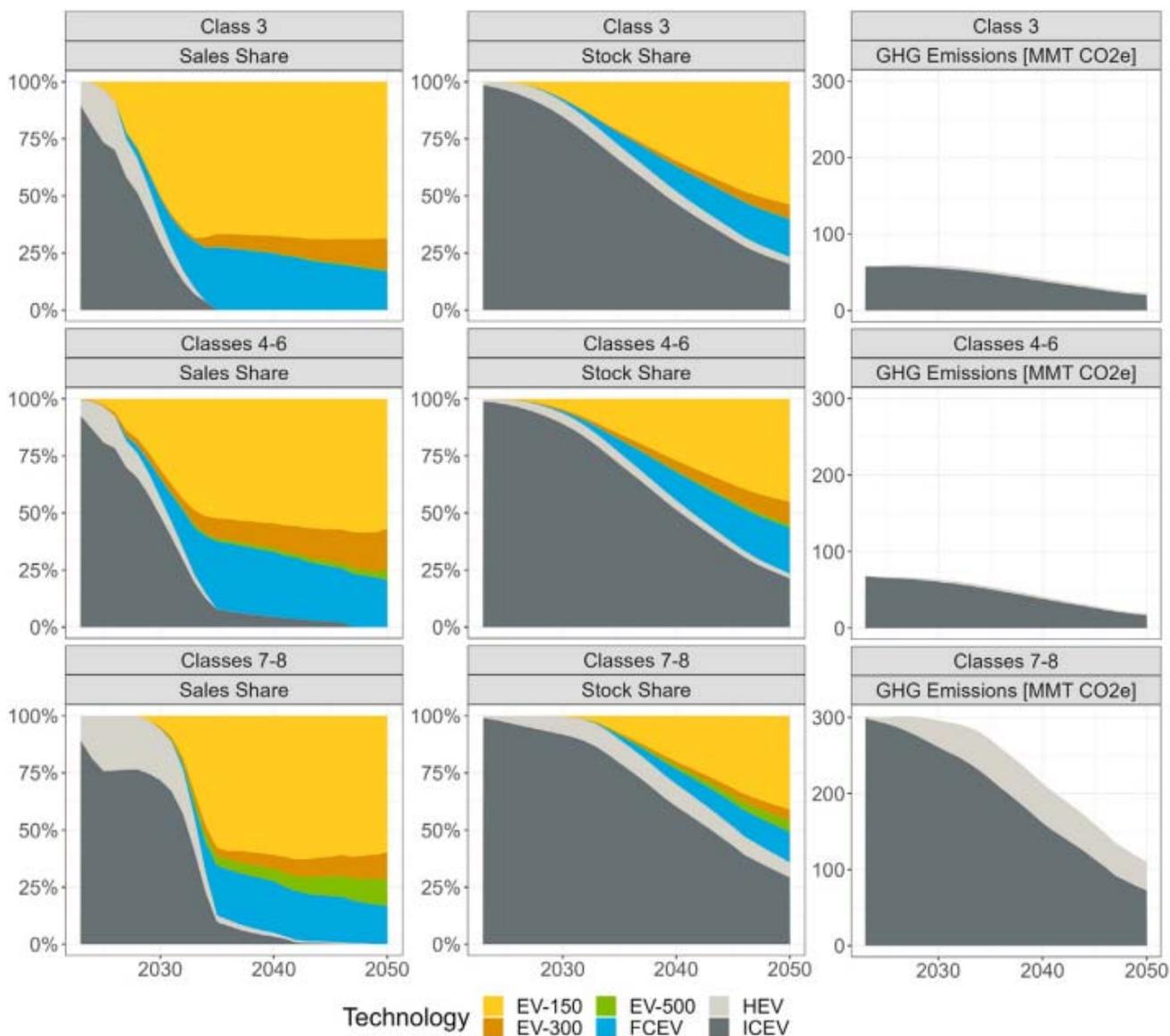


図 4. 主要シナリオにおける車両クラス・技術別販売シェア、保有シェア、GHG 排出量

航続距離 100~300 マイルの EV の販売は、クラス 3~6 で 2030 年より前に大幅に増加し、FCEV の販売は 2030 年から 2050 年の間に増加する。2030 年以降、より多くの ZEV が採用されるため、クラス 7~8 において最も大きな排出削減がもたらされる。

図 4 は、TEMPO モデルを使用して計算した主要シナリオにおける MHDV の販売、保有、および排出量の経時的な予測を示している。車両販売は、TCD に基づくロジット公式を使用して推定している (STAR 手法のセクションで詳しく説明)。統合車両保有モデルは、既存の保有台数の経年変化により、新規車両の需要を推定した (詳細については、補足情報の STAR 手法セクションおよびセクション S4 で説明)。エネルギー消費量と GHG 排出量は、各市場分野の車両保有台数と VMT に基づいて推定した。主要前提の条件下では、ZEV の販売は 2030 年に 38% に達し、その大部分は中小型・中型車クラスと短距離 EV に集中すると推定している。この期間中、年間エネルギー見通し (AEO) の予測に基づいて、総 VMT は 2019 年水準と比較して 10% 増加すると予測されている。^{2,16,34} VMT の増加と保有台数代替の鈍化により、ZEV の保有は 2030 年にわずか 5% であり、排出量の減少は

2019年と比較してわずか約3%である。2040年までに、ZEVの販売シェアは97%に達し、2019年と比較してZEVの保有シェアは41%、排出量は31%削減される。FCEVは、2030年代から2040年代にかけて、特に重量物や長距離の市場セグメントで販売台数が増加すると予測されており、2040年には自動車販売台数の25%、車両保有台数の10%を占める。2045年までに、ZEVの販売は99%に達する。2050年の保有はZEVが73%(EV 56%、FCEV 17%)で、VMTの増加は33%と予測されているにもかかわらず、2050年の排出削減は2019年比で65%となる。

IRA (Inflation Reduction Act : 米国インフレ抑制法) の車両購入税額控除の影響

次に、2022年のIRAの下で制定された商用クリーン自動車クレジットの影響を評価する。商用クリーン自動車クレジット(条項45W)は、プラグインハイブリッド車の車両購入価格の15%(本研究では考慮されていない)、EVおよびFCEVの車両購入価格の30%、または同等のICEVと比較した車両の増加コストのいずれか低い方の税額控除であり、クラス4~8で最大40,000ドル、クラス3で7,500ドルである。³⁵ この税額控除をTCD分析に組み込んでいるが、再生可能電力および水素製造への補助金(条項45/45Yおよび45V)、燃料補給インフラへの補助金(条項30C)、米国で製造されたバッテリーへの補助金(条項45X)など、燃料および部品の価格に影響を与えるIRAの他の側面に関する明確なモデル化は行っていない。しかし、私たちの主な前提条件は、ZEV技術と水素コストの改善を達成するために投資とインセンティブを必要とするDOEシナリオに暗黙のうちに沿ったものと想定している。

車両購入クレジットにより、ZEV、特にEVは、大幅に早い時間軸でディーゼル車と同等のTCDを達成する(図5)。中型車の場合、大半の車両は2026年までにTCDパリティを達成する(主要前提よりも1~4年早い)。普及が遅れが生じないで市場に馴染むと仮定すると、2023年から2032年の間に、70万台の小・中型車が販売され、ZEVは480億VMTとなり、テールパイプCO₂e排出量は33MMTの削減となる。中型車の場合、大半の車両は2023年または2024年までにTCDパリティを達成し(主要前提よりも3~9年早い)、その結果、さらに110万台の車両が販売され、ZEVは810億VMT、テールパイプCO₂e排出量は73MMTの削減になる。大型車の短距離市場分野は2027年から2030年の間に同等となる(インセンティブがない場合の2034年と比較して)。2034年も、地域内物流市場と長距離物流市場分野は同等性を達成し続けており、TCDベースではFCEVが依然として最もコスト競争力が高いとされる。TCDパリティに到達するための時間的変化がないのは、FCEVにおいてTCDの競争力に対する主な障壁となっているのは、燃料コストが高いことであり、これは主要シナリオから変わらないためである。2023年から2032年の間のEVにおける購入コストの低下は、TCDパリティに達するほど高くはない。しかし、EVはTCDパリティに近づき、IRAの車両購入クレジットの効果でより高い市場シェアを達成する。これにより、合計90万台の車両が販売され、ZEVでの走行距離が230億マイル増加し、長距離および短距離の大型市場セグメント全体で29MMTのCO₂eが削減される。2032年以降、税額控除が期限切れになると仮定すると、ZEVの販売は主要前提と同じ軌道をたどり、車両購入価格が主要軌道に戻る。このシナリオでは、製造のスケールアップやIRA税額控除によって生じるかもしれない学習によるさらなるコスト削減は考慮されていない。IRA税額控除により、ZEVの保有は主要シナリオの5%から2030年には20%に増加し、2030年の排出量は2019年と比較して8%削減される(主要シナリオでは3%削減)。2040

年には、ZEV の保有は主要シナリオの 41%から IRA 税額控除により 55%に増加し、2019 年と比較して 39%の排出削減が実現する(主要シナリオでは 31%)。最後に、2050 年には、ZEV の保有は主要ケースの 73%から IRA では 81%に増加し、排出量は 2019 年と比較して 70%削減される(主要シナリオでは 65%)。これにより、累積的に、2019 年から 2050 年までの MHDV GHG 排出量は、主要シナリオと比較して 6%削減される。

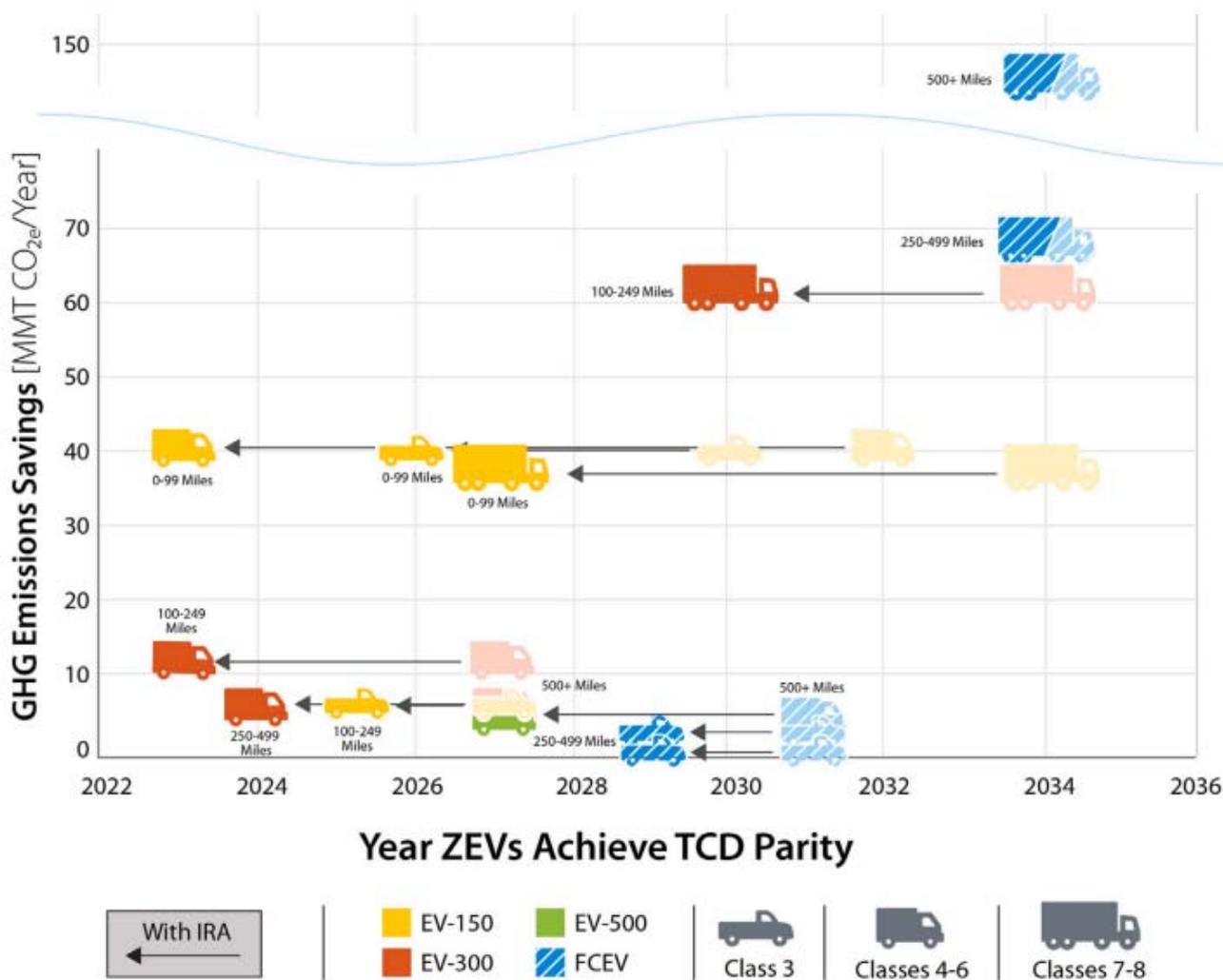


図 5. インフレ抑制法商用クリーン自動車(条項 45W)が MHDV クラス別・市場分野別 ZEV TCD パリティ年に与える影響

商用クリーン自動車クレジットは、ZEV が TCD パリティに到達する時間を大幅に短縮し、短期的な市場導入を可能にする。EV ラベル(EV-150、EV-300、EV-500)は、EV の航続距離をマイル単位で表わす。マイルラベル(0~99 マイル、100~249 マイルなど)は、市場分野における主な走行距離を示している。GHG 排出削減ポテンシャルは、2019 年のテールパイプ CO_{2e} 排出量から車両クラス別、走行距離別に推計し、セグメント全体がゼロエミッション化した場合の潜在的な排出削減量を表している。TCD パリティは、車両購入コストと、運用の最初の 3~5 年間の燃料費とメンテナンスコストを考慮して計算される。色は、従来の技術と最初に同等のコストを達成するゼロエミッション技術を表す。示していないが、他のゼロエミッション技術は、その後 TCD コストパリティに達し、コスト競争力を持つようになる可能性がある。

代替シナリオ: 燃料と技術

我々の検討結果は、将来の技術属性や燃料コストを取り巻く前提条件にかなり敏感であり、これら

は非常に不確実である。短距離用途では全クラスで初期資本コストが TCD 削減の最大のポイントであり、長距離用途では燃料コストが TCD の中でより大きなシェアを占める(図 2 を参照)。

燃料コストと将来の技術進歩が ZEV の導入に与える影響をより深く理解するため、より保守的な ZEV 技術の進歩、ディーゼル技術のより高度な技術の進歩、さまざまな燃料コストの仮定など、主要な前提条件のバリエーションを探る 10 のシナリオの組み合わせを評価した(表 2 を参照)。

表 2. 燃料と技術のシナリオ

シナリオ	内容
Cons. ZEV Tech Progress	Islamら ³¹ の結果から、ZEVの購入コストと燃料経済性の技術進歩は保守的となる。
Adv. ICEV & HEV Tech Progress	Islamら ³¹ の結果から、ICEVとHEVの購入コストと燃料経済性の技術進歩は先進的となる。
No EV-150	航続距離150マイルのEVは、全クラスの市場分野で運送事業者にとって運行は不適とみなされる。
Low Diesel	2008～2019年 ³⁶ の歴史的最低価格に基づき、軽油価格は2027年までには\$2.3/ガロンに下落。
High Diesel	AEOの石油高価格予測 ² に基づき、軽油価格は2040年までには\$6/ガロンになる。
Cons. Electricity	経路充電価格は2035年までには\$0.37/kWh、2040年までには\$0.35/kWhになる。一方で車庫充電価格は2035年までには\$0.21/kWh、2040年までには\$0.2/kWhになる(インフラの低利用率と高建設コストを想定)。
Adv. Electricity	経路充電価格は2035年までには\$0.19/kWh、2040年までには\$0.16/kWhになる。一方で車庫充電価格は2035年までには\$0.15/kWh、2040年までには\$0.13/kWhになる(インフラの高利用率と低建設コストを想定)。
Cons. Hydrogen	水素価格は、2030年までには\$7/kgになり、その後もさらなる改善はない。
Adv. Hydrogen	水素価格は、2035年までには\$4/kgになり、2040年までには\$3/kgになる。
Cons. Hydrogen & Electricity	Cons. Electricity と Cons. Hydrogen シナリオ統合の感度分析

図 6 は、これらの代替シナリオの GHG 排出量への影響を、我々の主要な前提条件と比較してプロットしたものである。

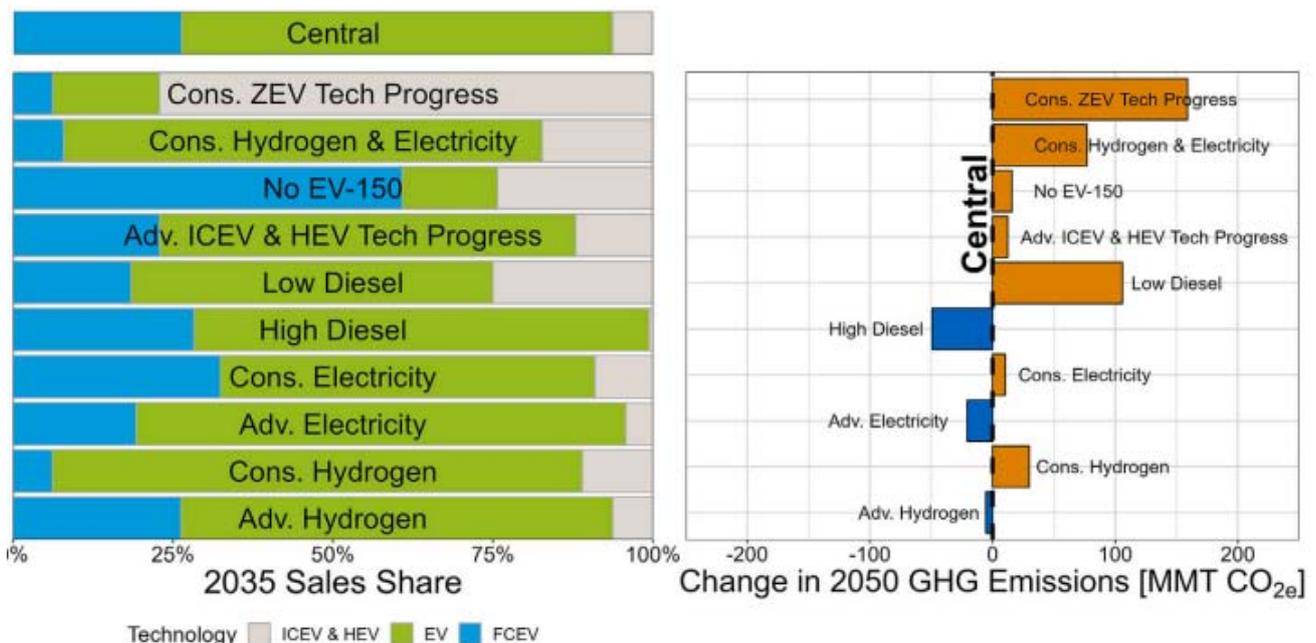


図 6. 前提条件を変えた場合の 2035 年における MHDV 販売と 2050 年の GHG 排出量の感度(主要シナリオと比較)

販売シェアと排出量は、市場分野や車両クラスによって VMT と燃費が異なるため、必ずしも互いに比例するわけではないことに注意が必要である。

ZEV の資本コスト低下と燃費改善速度が遅いことを前提とする Cons. ZEV Tech Progress シナリオは、2050 年の排出量増加が最も大きく(メインの前提条件よりも CO₂e は 159MMT 増加し、2019 年と比較して GHG 排出量削減は 28%にとどまる)、ZEV の販売が最も低くなる(2035 年に ZEV の販売が 23%、2050 年に 70%になる。主要前提条件と比較すると 94%と 100%になる)。むしろ、ICEV 技術がより急速に進歩し、資本コストが削減され、燃費が向上する場合(Adv. ICEV & HEV Tech Progress シナリオ)、排出ガスと ZEV 導入に及ぼす影響は小さくなり、CO₂e 排出量は 12MMT で、2035 年の ZEV 販売は 87%、2050 年の ZEV 販売は 99%となる。

過去の最低価格に基づく軽油価格の低下(Low Diesel シナリオ)は、排出量に対し 2 番目に大きな影響を与え、GHG 排出量が 106MMT 増加し(2019 年比で 40%削減)、2035 年の ZEV 販売シェアが 75%(2050 年までに 95%)になる。保守的な水素コストと電力コストの組み合わせ(Cons. Hydrogen & Electricity シナリオ)は、燃料生産と燃料補給ステーションの建設コストの増加、ステーションの利用率の低下などの要因によって発生する可能性がある。それらは同様の影響を及ぼし、その結果、2050 年の GHG 排出量は主要前提条件と比較して 77MMT 増加する。

その他の感度は、GHG の総排出量への影響が少なく、むしろ EV と FCEV のトレードオフを変える可能性がある。保守的な水素または電力コスト (Cons. Hydrogen および Cons. Electricity シナリオ) は、FCEV あるいは EV 技術が他の技術に置き換えられることが多い時は、2050 年の GHG 排出量を 10 ~ 30 MMT 増加させる。水素または電力に対する楽観的な仮定は、反対方向への同様の大きさを持っている。Adv. Electricity シナリオでは、2050 年の排出量を主要前提条件よりも 21MMT 削減し、2050 年の EV 保有は増加する(EV62%と FCEV12%)。Adv.水素シナリオでは、2050 年の排出量を 5MMT 削減し、FCEV の保有を増加させる(EV の 51%と FCEV の 22%)。より楽観的な感度(より有利な電力、水素、または軽油価格の仮定)の中で、軽油価格の上昇(2023 年から 2050 年までの平均 1 ガロンあたり価格はむしろ 4 ドルではなく 6 ドル/ガロン)は、主要前提条件と比較して最大の排出削減(2050 年に 49MMT の追加、または 2019 年と比較して 76%の排出削減)をもたらすことがわかった。

さらに、航続距離が 150 マイルの EV(EV-150)では、航続距離の制約があるために運送事業者が運行可能とは見なさないシナリオ(EV-150 なしシナリオ)も考慮した。このシナリオは、航続距離の不安や EV-150 の業務を妨げる航続距離要件などの懸念があるため、航続距離の短い EV を技術オプションとして除外する意味を探ることを目的としている。M/HDV 技術の選択肢から EV-150 を除外すると、短期的には ZEV の販売が大幅に減少し(2030 年の ZEV の販売は 13%、主要シナリオでは 38%)、EV と FCEV のバランスが変わる。長距離用途の EV は初期費用が高く、走行距離の短い市場分野での競争力が低いため、短距離用途では、航続距離の長い EV よりも FCEV の方が多く購入される。長距離走行における排出ガスは、短距離 EV と FCEV の代替により、大きな影響を受けない。ZEV の販売は 2040 年までに 88%、2050 年までに 99%に達し、2050 年の排出量は 2019 年と比較して 61%削減される。FCEV の保有は 2050 年までに 43%に増加し、EV の保有は 21%で、残りは ICEV と HEV となる。

図7は、いくつかの市場分野について、2035年の燃料コストの前提条件の変更に対する我々の主要な調査結果の感度を示している。これらの調査結果には、IRAの車両購入税額控除の影響は含まれていない。EVとFCEVはどちらも、複数の市場分野においてTCDベースで競争力を持つことができ、脱炭素化のための代替手段、場合によっては補完的な選択肢を提供する。短距離の小・中型・中型市場分野では、航続距離150~300マイルのEVは、TCDベースでディーゼル車と競争力があり、充電コストは\$0.35から\$0.4/kWh未満である(経路充電と車庫充電の両方での平均)。FCEVは、TCDベースで\$6から\$7/kg未満で競争力がある。大型車の場合、市場分野間の不均一性が高くなる。短距離用途(年間10,000マイル未満)では、EV-150は平均充電コストが\$0.38/kWh未満で競争力があるが、他の短距離および地域内物流(年間68,000~93,000マイルを走行)の場合、このコストは\$0.18から\$0.25/kWhまで変動する。年間100,000マイル以上を走行する長距離市場分野では、資本コスト、ルート中の充電時間による機会費用、燃料費の節約のトレードオフの結果として、長距離(500マイル)EVは、0.5MWの充電速度で平均充電コストが\$0.17から\$0.18/kWh未満でディーゼル車と競争力を持つようになる。0.5MWではなく1MWの充電速度を想定した場合(ルート充電の機会費用を削減)、長距離EVは、平均充電コストが\$0.22/kWh未満の場合、長距離市場分野で競争力がある。この分野には、さまざまな運用および給油要件(たとえば、チームおよびマルチシフトの運転とシングルシフトの運転)があり、その結果、運用・給油条件と価格ポイントが多様化する可能性があることに注意が必要である。ここに示す結果は平均的な推定値である。FCEVは、TCDベースでほとんどの大型車市場分野でコスト競争力を持つためには、水素コスト(車両供給時)が\$5/kgであることが必要である。補足図は、2035年に0.5MWと1MWの充電速度で、すべての大型車市場分野のTCDベースでのコスト競争力を示している(図S5.2およびS5.3)。これらの調査結果は、技術コストと軽油価格に敏感である。ZEV技術の進歩がさらに進むと想定される2050年には、長距離の大型車は\$0.26/kWh以下(1MW充電は\$0.29/kWh以下)、FCEVは水素コスト\$6/kg以下で競争力を持つようになる(図S5.4)。EVとFCEVの市場シェアは、長距離分野の燃料コストに非常に敏感である。水素コストの増加または充電コストの減少により、2つのテクノロジー間のトレードオフが変化する。

考察と結論

米国のMHDV分野全体におけるEVとFCEVの経済競争力をTCDベースで評価し、車両販売、保有台数増加、エネルギー使用、GHG排出にどのような影響を与えるかを評価した。政府と産業界が検討した技術コストと燃料価格の予測と、米国エネルギー省の高度な技術進歩シナリオの達成により、我々の調査結果は、EVとFCEVの両方を含むZEV技術が、2035年より前に複数の車両クラスと市場分野にわたり、従来型およびハイブリッドディーゼル技術とTCDベースで競争力を持つことができることを示している。小・中型、中型車クラス(クラス3~6)では、2032年までにすべての車両と用途において、主要シナリオと多くの感度でEVのTCDの競争力が達成される。大型車クラスでは、主要シナリオの仮定に基づき、EVは2035年までにすべての短距離および一部の長距離市場分野でTCD競争力を達成する。2035年には、EVは、充電コストが\$0.35から\$0.4/kWhを下回る時、すべての大型車で充電コストが\$0.17/kWh以下(一部の分野では最大\$0.38/kWhのコスト

競争力を持つ)を中心とする主要前提条件の下で、すべての短・中距離、中距離市場分野において TCD ベースでコスト競争力を持つことになる。充電時間にペナルティが課せられるため、充電速度の高速化(0.5MWではなく 1MW)により、地域および長距離分野での EV TCD の競争力が高まり、2035 年には\$0.22/kWh 以下の充電コストでディーゼル車と競争できるようになる。長距離大型市場分野における FCEV は、水素コストが\$5/kg 未満であれば 2035 年より前に、TCD ベースでコスト競争力を持つようになり、水素コストが\$7/kg を下回れば、この期間中に一部の短・中距離、中短距離用途で競争力を持つことができる。技術進歩により、主要シナリオでは、2030 年までに 38%、2046 年までに 99+%の ZEV 販売が達成される。TCD が自動車の導入を促進する場合(つまり、各車両クラスおよびセグメントで最も安価な技術が採用される場合)、TCD パリティに達すると、ZEV の需要が急速に増加する可能性がある。ZEV の販売が急速に拡大し、市場シェアがほとんどなかった状態から約 10 年で完全に支配的になるため、充電および燃料補給インフラ、製造能力、労働力、および経済の大幅なスケールアップが必要になる。これらはここでは考慮していないが、個別調査の対象となっている。例えば、Knehr らは、現在のメーカーの発表に基づいて、現在から 2035 年までの間に、小型車、中型車、大型車の需要を満たすために、米国で製造された自動車用リチウムイオン電池の十分な供給が利用可能になると予想している。³⁷ Atlas Public Policy は、現在、計画中および潜在的な大型 ZEV の生産能力は、年間最大 295,000 台生産可能と推定している。これは米国の年間大型車販売台数の 59%を占めることになるが、時期は明らかにされていない。³⁸ さらに、米国エネルギー省は、米国では年間 100 万台以上の充電器を生産する既存または計画されている能力があり、そのうち急速充電器が 6 万台含まれていると推定している。³⁹ これらの研究は、業界が ZEV 導入の迅速なスケールアップを可能にするために必要な複数の製造およびサプライチェーンの変革に取り組んでいることを示している。

2050 年までに、ZEV への急速な移行により、GHG 排出量は大幅に削減され、政策がない場合の 2019 年のレベルと比較して 65%、IRA の車両購入税額控除を考慮すると 70%が削減される。車両の代替を加速する政策や、従来の技術(持続可能な液体燃料など)からの GHG 排出量を削減する政策は、排出量をさらに削減する可能性がある。Hunter et al.¹⁵ および Burke et al.²⁴ では、EV は TCD ベースでより小型および短距離の市場分野で最も競争力があり、FCEV は長距離分野で競争力があることがわかった。これは、EV の充電時間が長く、経路充電コストが高いため、かなりのコストがかかるためである。短距離分野では、EV の充電コストは最も安く、最大で \$0.5/kWh である(この分析では、より高コストの調査は実施していない)。地域および長距離分野では、水素コストが \$6/kg 未満の場合、FCEV はディーゼルと TCD ベースでコスト競争力がある。EV は、充電コストが \$0.26/kWh(または 1MW の充電で 0.28 ドル/kWh)未満の場合、TCD ベースでコスト競争力がある。航続距離が 150 マイルの EV が利用不可能になると、短期的には ZEV の販売が大幅に減少し、航続距離の長い EV の初期費用が高く、走行距離の短い市場分野では競争力が低いため、EV と FCEV のバランスが変わる。全体として、EV と FCEV のトレードオフは、特にバッテリーの技術コストの不確実性、水素コスト、EV の充電コストに大きく依存しており、これは用途、時間、地域によって大きく異なると予想される。^{40,41} この不確実性は、さまざまな MHDV 用途における EV と FCEV の

両方の技術について、さらなる実証試験とデータ収集が必要であることを示している。EV や FCEV の普及を支えるためには、EV 充電や水素充填インフラの導入が必要であり、近い将来(2030 年以前)には車庫や固定ルートでのインフラの地域展開が必要となり、より長い時間軸での経路ネットワークの漸進的な構築が必要になる。充電と燃料補給のコストは、規模の経済とステーションの利用率に大きく影響される。競争力のあるコストを達成するためには、効率的な立地、有利な電気料金設計、および燃料(水素)の大量生産が必要である。

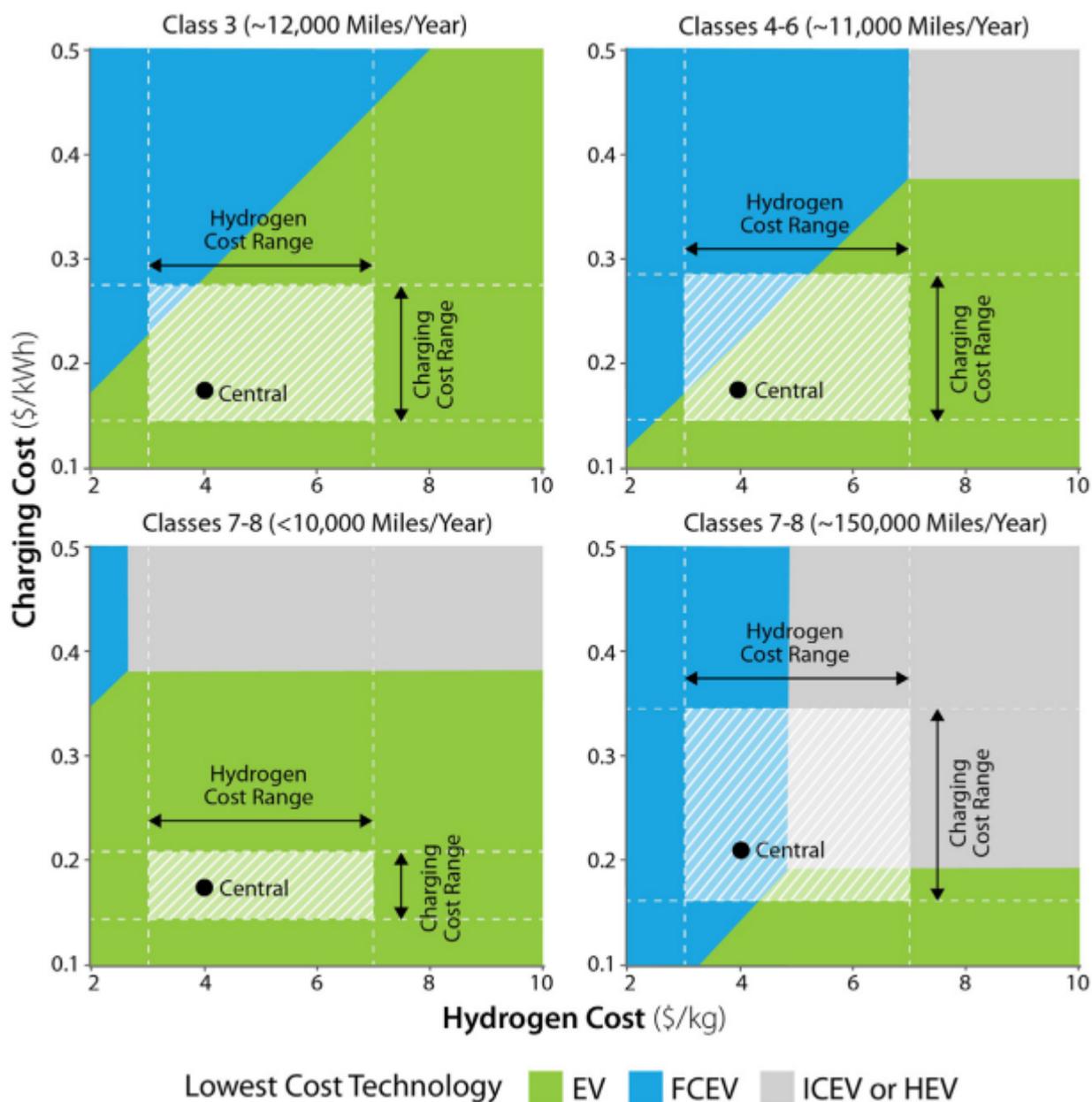


図 7. 燃料コスト感度 : 2035 年、主要技術の前提条件といくつかの市場分野

\$4/ガロンの軽油と 0.5MW の充電を想定した結果である。一部の短距離市場分野では、すべての EV クラスが TCD ベースでディーゼル車と競争しており、充電コストは \$0.35 から \$0.4/kWh 未満である。FCEV は、水素コストが \$7/kg 未満、長距離大型車分野で \$5/kg 未満で、小・中型、中型分野において TCD ベースで競争力がある。このシナリオは、IRA 車両購入税額控除の影響は含まれていない。

政策により、技術の移行はさらに加速し、排出量を削減することができる。2022 年インフレ抑制法

の商用クリーン自動車クレジット(条項 45W)は、ZEV が TCD 競争力を達成するために必要な時間を最大 9 年間短縮し、クリーン技術に対する強い需要を効果的に確保することができる(供給とインフラの制限により導入は制限される可能性がある)。水素製造税額控除は個別にモデル化されていないが、水素製造税額控除は水素コストの大幅削減を可能にするため、FCEV 技術は特定の用途でも競争力を持つことができ、急速な変化が起こる可能性が浮き彫りになっている。この移行を加速することによる排出量への影響は大きい。2050 年の排出削減は 2019 年と比較して 65%から 70%に増加し、累積排出量は 6%減少する。これらの車両税額控除は、ICEV のコストパリティに近い場合、主に短距離 EV の導入を支援する。長距離 EV の導入は、この研究でモデル化された車両購入価格の引き下げに加えて、インフラの拡張、急速充電または燃料補給時間、燃料コストの削減によって支援される可能性がある。電気代と水素コストを低く抑えることは、長距離 ZEV の TCD 競争力の重要な決定要因である。我々の分析には、将来の技術の進化や燃料コストなど、大きな不確実性が内在している。私たちの主要な調査結果は、ZEV の高度な技術進歩を前提としており、バッテリーパックのコストは 2050 年までに \$50/kWh に達し、燃料電池のコストは \$60/kWh に達し、水素は 2035 年までに生産、輸送、分配を含めて \$4/kg に達すると予想している。ZEV 技術の進歩をより保守的にみると、ゼロエミッション MHDV の TCD 競争力は大幅に遅れ、その結果、2050 年の排出削減は 2019 年と比較してわずか 28%であり、主要前提条件の下では 70%には届かない。水素と電力のコストをより悲観的に仮定をすると結果に大きな影響を与えるが、どちらか一方の燃料のみのコスト変動はそれほど影響しない。相対的な燃料コストの影響が少ないのは、EV と FCEV が市場シェアをめぐって互いに競争しているためである。一方の技術運用コストが変化すると、もう一方の技術が販売に占める割合が大きくなる。最後に、軽油価格の高騰は、両方の ZEV 技術の販売に大きなプラスの影響を与える。

この研究は、米国における商用 MHDV の TCD 競争力と脱炭素化の可能性について、部門全体で独自の視点を提供している。これまでの研究とは異なり、米国の商用車市場全体を考慮し、貨物移動やその他の用途(例えば、営業用車両)のためのすべてのトラッククラスをカバーしている。ゼロエミッション技術と燃料の継続的な進歩により、MHDV 分野の大規模な変革は経済性に基づいて実現可能であり、税額控除を通じてさらに加速することができ、その結果、今世紀半ばまでに大幅な脱炭素化が可能になることがわかっている。経済的な観点から見ると、ZEV 市場は、特に IRA のインセンティブを考慮すると、幅広い MHDV アプリケーションにわたって急速に成熟する間際にあることを示している。中型および大型の ZEV の需要が今後数年間で大幅に増加する可能性があると予想されるため、インフラと製造のスケールアップ、電力網の準備、大幅なコスト削減と排出削減の実現を可能にするための多くの利害関係者の関与など、導入を可能にするための将来を見据えた投資が必要である。

研究の限界

この分析では、TCD に基づいて潜在的な ZEV の販売を推定しているが、導入に影響を与える可能性のある他の要因は考慮していない。我々のシナリオでは、新車の需要が急速に増加する可能性があることを示唆されており、特に ZEV の販売シェアが 38%から 94%に増加する 2030 年から 2035

年の間に増加する。実際には、この拡大は、車両の供給、充電および燃料補給インフラの制限、労働力の制約、またはその他の供給関連要因によって制約される可能性がある。^{42,43} 2 番目に関連する考慮すべき事項は、中古車の市場である。我々は、車両が生涯にわたって指定された市場分野に留まると仮定している。実際には、中古車は、その寿命の中で市場分野間で移動する可能性がある(たとえば、大型車は経年劣化に伴い長距離から短距離の用途にシフトする)。この仮定は、車両が販売される初期市場分野での導入率に応じて、プラスまたはマイナスの影響を与える可能性がある。最後に、鉄道、海上、陸上輸送モード間のシフトや、トラックの移動行動や移動距離の変更など、貨物分野の将来の物流上の変化は考慮していない。今後の研究分野には、モードシフトや物流の変更など、潜在的な市場変革の分析、ZEV の導入を完全にサポートするためのインフラと充電ニーズの詳細な分析、業務用車両の運用プロファイルのさらなる分析、電力や水素製造分野を含む ZEV の導入拡大につれて、オンロードと供給サイドの排出量の共通の分析が含まれる。

STAR メソッド

詳細な方法は、この論文のオンライン版で提供されており、次のものが含まれる:

- ・ 主要なリソース表
- ・ リソースの実用性
 - 主たる連絡先
 - 材料の入手可能性
 - データとコードの実用性
- ・ 方法の詳細
 - スコープと市場セグメンテーション
 - 運転の総コストを見積もるためのフレームワーク
 - 車両の販売、ストック、排出量を見積もるためのフレームワーク
 - シナリオ設計と入力の仮定

補足情報

補足情報は、<https://doi.org/10.1016/j.isci.2024.109385> でオンラインから入手できる。

謝 辞

この研究の一部は、Alliance for Sustainable Energy, LLC が運営する National Renewable Energy Laboratory が、米国エネルギー省(DOE)の契約 DE-AC36-08GO28308 に基づいて執筆した。資金は、米国エネルギー省のエネルギー効率・再生可能エネルギー局から提供された。本稿での見解は、必ずしもエネルギー省または米国政府の見解を表すものではない。米国政府は、記事の出版を受け入れることにより、米国政府が、この著作物の公開形式を出版または複製するための非独占的、支払い済み、取消不能の世界的なライセンスを保持していることを認める。これは、米国政府の目的のために公開される。著者は、入力データを提供し、結果のレビューを支援した DOE の専門家である Michael Berube、Mike Laughlin、Michael Weismiller、Neha Rustagi、Jay Fitzgerald、Mark Melaina、

Jacob Ward, Raphael Isaac, Patrick Walsh, Zia Haq, Noel Crisostomo に感謝する。また、有益な議論をしてくださった Mike Roeth 氏と Rick Mihelic 氏(NACFE)にも感謝する。著者はまた、結果のレビューとフィードバックを提供してくれた次の NREL 専門家に感謝する:Alicia Birky, Brennan Borlaug, Chris Gearhart, John Farrell, Keith Wipke, Kenneth Kelly, Margaret Mann, Johney Green。最後に、著者は、TEMPO モデルの開発中に貴重なサポート、提案、および推奨事項を提供してくれた TEMPO 運営委員会のメンバーに感謝したい: A. Brown, K. Podkaminer, R. Isaac, M. Melaina, Z. Haq, K. Lynn (DOE); J. Maples (EIA); A. Schilla and K. Jaw (CARB); B. Kanach (ExxonMobil); B. Gross (EPRI); D. Arent (NREL); D. McCollum (ORNL); J Davies (DOT); J. Weyant (Stanford); P. Kyle (PNNL); P. Cazzola (UC Davis); C. Ramig (EPA); A. Eggert (ClimateWorks); B. Sovacool (Boston University); and Y. Fu (Ford).

REFERENCES

- DOE, DOT, EPA, and HUD (2023). The U.S. National Blueprint for Transportation Decarbonization (U.S. Department of Energy, U.S. Department of Transportation, U.S. Environmental Protection Agency, and U.S. Department of Housing and Urban Development).
- EIA (2023). Annual Energy Outlook 2023 (U.S. Energy Information Administration).
- Ledna, C., Muratori, M., Yip, A., Jadun, P., and Hoehne, C. (2022). Decarbonizing Medium- & Heavy-Duty On-Road Vehicles: Zero-Emission Vehicles Cost Analysis (National Renewable Energy Laboratory).
- CALSTART (2023). Memorandum of Understanding on Zero-Emission Medium- and Heavy-Duty Vehicles (CALSTART).
- Hoehne, C., Muratori, M., Jadun, P., Bush, B., Yip, A., Ledna, C., Vimmerstedt, L., Podkaminer, K., and Ma, O. (2023). Exploring decarbonization pathways for USA passenger and freight mobility. *Nat. Commun.* 14, 6913.
- California Air Resources Board (2021). Advanced Clean Trucks Fact Sheet. <https://ww2.arb.ca.gov/resources/fact-sheets/advanced-clean-trucks-fact-sheet>.
- The White House (2022). Fact Sheet: Vice President Harris Announces Actions to Accelerate Clean Transit Buses, School Buses, and Trucks. <https://www.whitehouse.gov/briefing-room/statements-releases/2022/03/07/fact-sheet-vice-president-harris-announces-actions-to-accelerate-clean-transit-buses-school-buses-and-trucks/>.
- Yarmuth, J.A. (2022). Inflation Reduction Act of 2022.
- Greenhouse Gas Emissions Standards for Heavy-Duty Vehicles—Phase 3, 88 F.R. 25926 (proposed April 27, 2023) (to be codified at 40 C.F.R. pts. 1036, 1037, 1054, 1065, and 1074) (2023).
- IEA (2023). Global EV Outlook 2023 (IEA).
- Muratori, M., Borlaug, B., Ledna, C., Jadun, P., and Kailas, A. (2023). Road to zero: Research and industry perspectives on zero-
- Knehr, K., Kubal, J., and Ahmed, S. (2024). Cost Analysis and Projections for U.S.-Manufactured Automotive Lithium-Ion Batteries (Argonne National Laboratory).
- Burget, S., Latham, S., and Vining, M. (2023). Manufacturing Capacity for Heavy-Duty Zero-Emission Vehicles in the United States (Atlas Public Policy).
- DOE (2024). Building America's Clean Energy Future (U.S. Department of Energy).
- Bennett, J., Mishra, P., Miller, E., Borlaug, B., Meintz, A., and Birky, A. (2022). Estimating the Breakeven Cost of Delivered Electricity to Charge Class 8 Electric Tractors (National Renewable Energy Laboratory).
- Borlaug, B., Salisbury, S., Gerdes, M., and Muratori, M. (2020). Levelized Cost of Charging Electric Vehicles in the United
- Muratori, M., Alexander, M., Arent, D., Bazilian, M., Cazzola, P., Dede, E.M., Farrell, J., Gearhart, C., Greene, D., Jenn, A., et al. (2021). The rise of electric vehicles - 2020 status and future expectations. *Prog. Energy* 3, 022002.
- NACFE (2023). Early Lessons Learned from Run on Less - Electric Depot (North American Council for Freight Efficiency).
- Hunter, C., Penev, M., Reznicek, E., Lustbader, J., Birky, A., and Zhang, C. (2021). Spatial and Temporal Analysis of the Total Cost of Ownership for Class 8 Tractors and Class 4 Parcel Delivery Trucks (National Renewable Energy Laboratory).
- EIA (2019). Annual Energy Outlook 2019 (U.S. Energy Information Administration).
- Federal Highway Administration (2019). Freight Analysis Framework - 2017 (Federal Highway Administration).
- U.S. Census Bureau (2004). Vehicle Inventory and Use Survey (VIUS). <https://www.census.gov/library/publications/2002/econ/census/vehicle-inventory-and-use-survey.html>.
- ITF (2022). Decarbonising Europe's Trucks: How to Minimise Cost Uncertainty (OECD Publishing).
- Tanco, M., Cat, L., and Garat, S. (2019). A break-even analysis for battery electric trucks in Latin America. *J. Clean. Prod.* 228, 1354–1367.
- Phadke, A., Khandekar, A., Nikit, A., Wooley, D., and Rajagopal, D. (2021). Why Regional and Long-Haul Trucks Are Primed for Electrification Now (Lawrence Berkeley National Laboratory).
- Basma, H., Buysse, C., Zhou, Y., and Rodriguez, F. (2023). Total Cost of Ownership of Alternative Powertrain Technologies for Class 8 Long-Haul Trucks in the United States (The International Council on Clean Transportation).
- Moultak, M., Lutsey, N., and Hall, D. (2017). Transitioning to Zero-Emission Heavy-Duty States. *Joule* 4, 1470–1485. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2020.05.013>.
- Ballinger, B., Stringer, M., Schmeda-Lopez, D.R., Kefford, B., Parkinson, B., Greig, C., and Smart, S. (2019). The vulnerability of electric vehicle deployment to critical mineral supply. *Appl. Energy* 255, 113844.
- Hao, H., Geng, Y., Tate, J.E., Liu, F., Chen, K., Sun, X., Liu, Z., and Zhao, F. (2019). Impact of transport electrification on critical metal sustainability with a focus on the heavy-duty segment. *Nat. Commun.* 10, 5398.
- National Renewable Energy Laboratory Data provided by NREL Based on Analysis of 2013 IHS Polk Vehicle Registrations, the 2002 Vehicle Inventory and Use Survey, 2018 Data from the American Public Transportation
- Lund, J., Mullaney, D., Porter, E., and Schroeder, J. (2022). Charting the Course for Early Truck Electrification (RMI).
- Liimatainen, H., van Vliet, O., and Aplyn, D. (2019). The potential of electric trucks - An international commodity-level analysis. *Appl. Energy* 236, 804–814.
- Çabukoglu, E., Georges, G., Küng, L., Pareschi, G., and Boulouchos, K. (2018). Battery electric propulsion: an option for heavy duty vehicles? Results from a Swiss case study. *Transport. Res. C Emerg. Technol.* 88, 107–123.
- Earl, T., Mathieu, L., Cornelis, S., Kenny, S., Ambel, C.C., and Nix, J. (2018). Analysis of Long Haul Battery Electric Trucks in EU: Marketplace and Technology, Economic, Environmental, and Policy Perspectives.
- Ainalis, D., Thorne, C., and Cebon, D. (2023). Technoeconomic comparison of an electric road system and hydrogen for decarbonising the UK's long-haul road freight. *Res. Transp. Bus. Manag.* 48, 100914.
- Muratori, M., Jadun, P., Bush, B., Hoehne, C., Vimmerstedt, L., Yip, A., Gonder, J., Winkler, E., Gearhart, C., and Arent, D. (2021). Exploring the future energy-mobility nexus: The transportation energy & mobility pathway options (TEMPO) model. *Transport. Res. Transport Environ.* 98, 102967. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102967>.
- Islam, E.S., Vijayagopal, R., Moawad, A., Kim, N., Dupont, B., Nieto Prada, D., and Rousseau, A. (2021). A Detailed Vehicle Modeling & Simulation Study Quantifying Energy Consumption and Cost Reduction of Advanced Vehicle Technologies through 2050 (Argonne National Laboratory).
- NREL (Forthcoming). MHDV Corridor and Depot Charging Costs (National Renewable Energy Laboratory)
- US Hydrogen Interagency Task Force (2023). US National Clean Hydrogen Strategy and Roadmap (US Hydrogen Interagency Task Association, Federal Highway Administration data, and other sources)
- EIA (2022). MHDV Scrappage Rates.
- Muratori, M., Elgqvist, E., Cutler, D., Eichman, J., Salisbury, S., Fuller, Z., and Smart, J. (2019). Technology Solutions to Mitigate Electricity Cost for Electric Vehicle DC Fast Charging. *Appl. Energy* 242, 415–423. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.03.061>.
- Phadke, A., McCall, M., and Rajagopal, D. (2019). Reforming electricity rates to enable economically competitive electric trucking. *Environ. Res. Lett.* 14, 124047. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab560d>.
- Greene, D.L., Ogden, J.M., and Lin, Z. (2020). Challenges in the designing, planning and deployment of hydrogen refueling infrastructure for fuel cell electric vehicles. *eTransportation* 6, 100086.