

Greenpeace East Asia Tokyo Office

日本における乗用車の脱炭素化が マクロ経済と環境に及ぼす影響に ついて



Final Report

December
2021

Cambridge Econometrics
Cambridge, UK

info@camecon.com
www.camecon.com

本件に関するお問い合わせ先: Jon Stenning js@camecon.com

作成者: Matteo Caspani
Áron Hartvig adh@camecon.com
Jon Stenning js@camecon.com
An Vu av@camecon.com (Cambridge Econometrics)

プロジェクトディレクター: Jon Stenning js@camecon.com

Cambridge Econometrics は、社会が直面する複雑な課題に対処するため、独自の経済的分析に基づき、明快かつ有益な考察を提供することを目指しています。

www.camecon.com

Cambridge Econometrics Limited は、慈善団体 the Cambridge Trust for New Thinking in Economics が運営する機関です。

www.neweconomicthinking.org

目次

	ページ
1 序論	9
1.1 背景	9
1.2 方法論	9
2 シナリオ概要	11
2.1 シナリオ設計	11
2.2 自動車販売と保有台数	11
2.3 エネルギー需要	13
3 モデル化における前提	15
3.1 モデル化における共通の前提	15
3.2 ICE の燃費向上	16
3.3 車両コスト	18
3.4 バッテリーのコストと航続距離	19
3.5 燃料電池自動車	23
3.6 電力部門における予測	27
4 インフラ整備要件	29
4.1 EV のインフラ	29
4.2 Hydrogen infrastructure 水素供給インフラ	31
4.3 インフラにおける累積投資額	33
5 社会経済的影響	35
5.1 実質 GDP への影響	35
5.2 雇用	36
5.3 化石燃料の輸入	38
6 環境への影響	40
6.1 CO ₂ 排出量に対する影響	40
6.2 粒子状物質と窒素酸化物の排出量の変化	41
7 電力部門の脱炭素化による影響	43
7.1 電力消費に伴う CO ₂ 排出量	43
7.2 電力部門の脱炭素化における経済的影響	45

8	結論	47
9	Appendices	48

表	表 0.1: 用語と略語	6
	表 2.1: 各シナリオの設定条件	11
	表 3.1: 自動車ストック型モデルで採用した主な前提	15
	表 3.2 2050年までのガソリン ICE 車における燃費技術の展開（新車に搭載されている割合）	17
	表 3.3 2050年までのディーゼル ICE 車における燃費技術の展開（新車に搭載されている割合）	17
	表 3.4 技術別の燃費向上率とコスト	18
	表 3.5: バッテリーパックサイズの予測	20
	表 3.6: バッテリーシステムのコスト予測	21
	表 3.7: 電動パワートレインのコスト予測（モーター、インバータ、ブースター）(単位：US\$、2021年の為替相場)	21
	表 3.8: 電動パワートレインとバッテリーのコスト合計（単位：US\$、2021年の為替相場）	21
	表 3.9: バッテリー充電状態 (SOC)	21
	表 3.10: 電気走行のみによる航続距離	22
	表 3.11 水素燃料車における航続距離、及びモーターと燃料電池システムの出力のモデル化による予測	24
	表 4.1: 充電スタンドの定義とコスト	28
	表 4.2: TECH 2030 フェーズアウトシナリオにおける HRS 総数内訳	31
	表 5.1: マクロ経済指標	35
	表 7.1: 電力部門の脱炭素化におけるマクロ経済的指標	45

グラフ	図 2.1: REF シナリオにおける新車販売構成（左）と保有台数構成（右）	12
	図 2.2: CPI シナリオにおける新車販売構成（左）と保有台数構成（右）	13
	図 2.3: TECH 2030 フェーズアウトシナリオにおける新車販売構成（左）と保有台数構成（右）	13
	図 2.4 シナリオ別、ガソリン、軽油、LPG（液化石油ガス）、水素、電気（ギガワット時）の需要	14
	図 3.1: 現在までと今後の燃料電池システムのコスト推移（ドルは 2021 年の為替相場）	23
	図 3.2: 高出力の燃料電池乗用車用水素タンクのコスト予測の推移（単位：US\$、2021 年の為替相場）	23
	図 3.3 全世界における燃料電池システムとタンクのメーカー別年間生産量予測（単位：千台）	24
	図 3.4 FCEV の軽自動車、普通自動車及び小型車の燃料消費予測 (H ₂ kg/100km)	25
	図 3.5 Hydrogen Council (2020)による水素燃料の価格予測 (US\$ / kg、2021 年の為替相場)	26
	図 3.6: 「中心的」シナリオにおける燃料別年間発電量（発電総量に占める割合）	26
	図 3.7: 「脱炭素化シナリオ」における燃料別年間発電量（総発電量に占める割合）	27

図 4.1 CPI シナリオ (左) と TECH 2030 フェーズアウトシナリオ (右) における EV のサポートに必要な累積投資額推移 (単位: US\$, 2021 年の為替相場)	29
図 4.2 水素充填ステーションの初期費用 (左) と運営固定費 (単位: 水素 1kg あたりの US\$, 2021 年の為替相場)	30
図 4.3 CPI シナリオ (左) と TECH2030 フェーズアウトシナリオにおける、全 FCEV に対応できる累積必要投資額 (単位 10 億 US\$, 2021 年の為替相場)	32
図 4.4 各シナリオにおけるインフラ整備にかかる累積投資額 (単位 10 億 US\$, 2021 年の為替相場)	33
図 5.1 REF シナリオと比較した GDP 推移	34
図 5.2 車の脱炭素化による部門別雇用への影響 (TECH2030 フェーズアウトシナリオの REF シナリオに対する比較)	36
図 5.3 化石燃料の年間輸入削減量 (REF シナリオとの差、単位: mboe)	37
図 5.4 化石燃料の累積輸入削減量 (REF シナリオとの差、単位: mboe)	38
図 5.5 年間石油輸入量減少量 (REF シナリオに対するパーセンテージ)	38
図 6.1: 新車の平均 CO ₂ 排出量推移 (走行 1Km あたりの排出 g)	39
図 6.2 全保有車からの平均排ガス量 (KtCO ₂)	40
図 6.3 シナリオにおける 2020 年時点からの NO _x 排出量の削減率	41
図 6.4 各シナリオにおける 2020 年時点からの PM ₁₀ 排出量の削減率	41
図 7.2 各シナリオにおける年間間接 CO ₂ 排出量 (電力部門の「脱炭素化」ケース)	43
図 7.1 シナリオにおける年間間接 CO ₂ 排出量 (電力部門の「中心的」ケース)	43
図 7.4 自動車に関連した全工程におけるシナリオ別 CO ₂ 累積排出量 (電力部門の「脱炭素化」ケース)	44

用語と略語

表 0.1 ではこのレポートで使用される用語及び略語について説明する。

表 0.1: 用語と略語

	略語	説明
パワートレインのタイプ		
内燃エンジン	ガソリンもしくはディーゼル ICE 車	内燃エンジンを搭載した従来のガソリンもしくはディーゼル車。多様なシナリオが考えられる中で、ガソリンもしくはディーゼル ICE 車の燃費向上には、様々な段階が存在する。それにはエンジンやトランスミッションの選択肢の幅、走行抵抗の軽減、低燃費タイヤの採用、ハイブリッド化を含む。 我々のガソリンもしくはディーゼル ICE 車の定義におけるハイブリッド化とは、アイドリングストップ技術と回生ブレーキを搭載したマイクロハイブリッド化に限定する。
ハイブリッド電気自動車	HEV	純粋な EV モードで走行可能な完全ハイブリッド電気自動車。ガソリンもしくはディーゼル ICE 車に分類されるマイクロハイブリッドより大型のバッテリーを搭載している。
プラグインハイブリッド電気自動車	PHEV	プラグインハイブリッド電気自動車。大型のバッテリーと内燃エンジンを搭載している。外部電源につないで車のバッテリーを充電することができる。レンジエクステンダーを搭載した EV は今回の調査対象となっていない。
バッテリー式電気自動車	BEV	内燃エンジンを搭載していないバッテリーの電力のみを使って走行する完全な電気自動車。
燃料電池電気自動車	FCEV	主に、燃料電池とバッテリー駆動式電動モーターを搭載した水素燃料車。
ゼロカーボン車	ZEV	排ガスゼロ車すべて。(FCEV や BEV など)
経済用語		
国内総生産	GDP	一定期間に、国内で生産されたモノやサービスの付加価値の総額。
その他の略語		
二酸化炭素回収貯留	CCS	発電所や工場から排出される CO ₂ を大気に放散される前に分離回収する技術。回収された CO ₂ は地中深くの地層などに貯留する。
熱電併給システム (コージェネレーション)	CHP	発電と同時に、排出された熱エネルギーを利用する技術。
新欧州ドライビングサイクル	NEDC	2017 年 9 月まで欧州で採用されていた、自動車の排出ガスや燃費を測定する試験サイクル。
オリジナル機器メーカー	OEM	自動車に搭載される機器のメーカー。

石油換算百万バレル	MBOE	石油の体積単位（天然ガスなどを石油の熱量に換算したもの）
乗用車等の国際調和排出ガス・燃費試験方法	WLTP	2017年9月より欧州で導入されている排出ガスや燃費を測定する試験サイクル。
水素充填ステーション	HRS	自動車に水素燃料を供給するインフラ。
充電状態	SOC	フル充電に対する、バッテリーの充電レベル。

概要

このレポートでは、日本における乗用車の脱炭素化が、マクロ経済と環境にもたらす影響について、2030年までの中期と2050年までの長期において予測している。自動車技術の予測される未来の様々なパターンを基にシナリオを組み立て、影響を評価するために経済のモデル化を応用する。分析調査は、Cambridge Econometrics がグリーンピース・ジャパンと協力して行い、日本における自動車の脱炭素化がもたらす可能性のある経済的影響、移行に伴う課題を予測した。

本レポートは分析結果を提示し、低炭素モビリティへの移行における経済的影響、充電インフラの整備に関する必要条件、技術にかかるコストについても詳しく述べている。

分析によれば、2030年までに迅速な移行が行われ、内燃エンジン車及びハイブリッド車に代わって、バッテリー式電気自動車が多数を占めるようになる：

- 化石燃料の使用量が急速に減少し、2050年までに石油の輸入量が約48億バレル削減される。
- 発電における間接的な排出を計算に入れたとしても、このまま積極的な対策を取らなかった場合と比べて、CO₂排出量の大幅な削減を実現できる。2030年までにICE車とハイブリッド車を廃止すれば、自動車からの排気ガスは2050年にはベースラインより99%減少する。排気ガスに発電における排出分を加えたCO₂排出量は、同時期に電力供給網の脱炭素化が行われれば2050年までにほぼ半減させることが可能である。
- 2050年までにはGDPがベースラインより1.2%以上アップし、中期においても長期においても経済にプラスの効果をもたらす。電気自動車の価格がエンジン車やハイブリッド車よりも安くなり、充電する方が、化石燃料を給油するより大幅に安くなる。その結果、消費者はエンジン車に比べて、より低価格で電気自動車を購入し、維持費も節約できるようになる。これにより、輸入化石燃料の消費が減り、その分他のモノや国内のサービスの消費が増える。
- 特にサービス業や製造業において新しい雇用が生まれる。新しい雇用は、電気自動車のサプライチェーンの一部である製造部門で生まれるだけでなく、経済全体における個人消費の増加とも関連している。それは従来の自動車と化石燃料の産業で発生する失業者数を上回り、2050年には主に国内のサービス部門で、30万件近くの新規雇用が生まれていると予測される。
- 電気自動車への移行と同時に電力部門の脱炭素化が行われれば、発電によるCO₂排出が減少するため環境に与えるメリットはより大きくなるが、社会経済的な影響はさほど大きなものではない。一方、脱炭素発電への投資が増加するので、GDPにはもっと早期に大きなプラスの効果が現れる。しかし、GDPを長期に渡って見ると、ベースラインは上回るものの、電気料金が上昇するため、電力部門で脱炭素化が行われない場合に比べると、わずかに落ち込みを見せる。

1 序論

1.1 背景

日本の新しい乗用車に対する排ガス規制は世界で最も厳しいもののひとつである。以前より日本では、燃費向上を奨励し補助金を出してきた。そして日本の OEM の革新的な功績を考えると、日本で保有されている乗用車群は世界で最も燃費が良いということになる¹。にもかかわらず、2017年の日本における CO₂総排出量のうち、輸送部門が 18%を占めている²。

さらに、日本は、低炭素車の普及において他の先進国より遅れをとっている。2020年上半期、純粋なバッテリーだけで走る電気自動車 BEV は、国内の総売上の 1%以下だった。その上、2020年1年間の見通しでは、BEV とプラグインハイブリッド (PHEV) の販売台数は、2019年に比べ減少するだろうと予測された。BEV のシェアが増加している主要諸国の市場とは対照的である。国産の BEV では、日産のリーフがトップセールスを記録している。しかし、主流は依然プラグインハイブリッド (トヨタのプリウス PHV や三菱自動車のアウトランダー PHEV) で、自動車業界や日本政府も後押ししている。また、日本の自動車メーカーは、トヨタの MIRAI のような燃料電池車の製造販売も引き続き推進している。その結果、現在、日本の水素供給ステーションのネットワークは世界最大規模となっている。

日本政府は、2030年年代半ばから、従来の内燃エンジン車の販売を禁止する計画を発表したが、プラグインハイブリッドや、プラグインできない従来型ハイブリッドの具体的な新車販売終了時期を示していない。政府は時間をかけて電気自動車へ移行していくことを考えて、ハイブリッド車を内燃エンジン車 (ガソリンもしくはディーゼル ICE 車) からゼロカーボン車へ移行する際の中心的な架け橋役と位置付けている。

この分析の目的は、日本において乗用車の脱炭素化が及ぼす可能性のある、マクロ経済と環境への影響を探ることであり、2030年までの短期間でゼロカーボンでない車の新規製造販売を全面的に廃止した場合と、2035年までに従来のガソリンもしくはディーゼル ICE 車のみ新規製造販売を廃止した場合にたどる過程の予測を比較している。具体的には、関連サプライチェーンを含む国内の製造業における影響と広範に渡る日本経済への影響を考察するものである。

1.2 方法論

この研究では、自動車の排ガス規制に対応して、特定の複数の低炭素車技術群が導入され、取り込まれたと仮定する一連のシナリオを定義する。消費者の代替自動車技術購入の決定に影響を及ぼす特定の要因は、評価の対象としない。

方法論、以下の重要な2段階を伴い行われる。

- 1) シナリオを定義し、モデル化の重要な前提を決定する。
- 2) 総合的なモデル化のフレームワークに、Cambridge Econometrics の以下2つのモデルを採用する。

¹ 国際クリーン交通委員会 (ICCT) ジャパン～2021年11月15日時点の情報

² Transport and Environment in Japan 2020～2021年11月15日時点の情報

(i)自動車ストック型モデル：エネルギー需要、排出ガス、車両価格、技術面のコスト、維持費も含めた車の所有者の負担総額に対する、代替低炭素車の販売構成の影響を予測するのに使用。

(ii) E3ME モデル：低炭素車への移行における社会経済的な影響を幅広く予測するのに使用。

自動車ストック型モデルは、規定の自動車の搭載技術群に対する、燃料の需要、排出ガス量、車体価格を算出する。このモデルは、新しく販売される車の燃費と車両残存率の情報を使って、販売される新車の変化が全体の保有車の特徴にどのように影響するかを予測する。また、このモデルは新車の燃費と価格が、更なる燃費向上技術の搭載によってどのように変わるかを、技術ごとに詳しく算出した技術サブモデルも含む。自動車ストック型モデルは、パワートレイン5種、燃料6種、車体サイズによる規格2種（軽自動車、普通及び小型自動車）に細分類されている³。

燃料需要や車体価格といった、自動車ストック型モデルが算出したデータの一部は、次に E3ME モデルにインプットされる。E3ME モデルは、地球規模でのエネルギーシステム、環境、経済間の繋がりをマクロ計量経済学で総合的に示すモデルである。日本も明確にカバーした地域別、部門別の高度細分化によって、日本に特化したシナリオのモデル化、自動車と石油精製産業における主要サプライチェーンの部門間の関係の詳細分析が可能になっている。E3ME モデルは、低炭素車への移行が世帯収入、原油や石油産業、消費活動、GDP、雇用、CO₂、NO_x、粒子状物質の排出に与える影響について予測している。

詳細情報、及びモデルに関するマニュアルのフルバージョンは、www.e3me.comにてご確認されたい。また、このレポートの最後にある補足資料に、モデルの概略説明も載せている。

³ 詳細は第3章の表3.1を参照のこと

2 シナリオ概要

2.1 シナリオ設計

このレポートの分析は、Cambridge Econometrics が NGO グリーンピースと共同で作成した一連のシナリオを基にしており、各シナリオにはそれぞれ異なる新車の販売構成を想定している。これらのシナリオは脱炭素化がたどる道を予測し、低炭素パワートレインへの移行における影響を推し測るものであるが、国内の乗用車の今後の構成に関し、現在の予測を必ずしも反映するものではない。各車の普及度は推測に基づく。暗に、政策によって変化することが考えられるが、その想定はシナリオに組み込んでいない。この調査のためにモデル化した3つの主要シナリオの概要は表 2.1 で示す通りである。

表 2.1: 各シナリオの設定条件

シナリオ	説明
REF (基準)	<ul style="list-style-type: none"> 2021年以降、燃費技術の展開や、新車販売構成に変化なし。 消費者による車の買い替えに伴い、日本における保有車全体の燃費に何らかの向上が見られる。
CPI (現在の政策)	<ul style="list-style-type: none"> 燃費向上と新しいパワートレインの展開。 2035年までに、ガソリンもしくはディーゼル ICE 車の新車販売は廃止。 2035年以降は更なる変更はなし。
TECH 2030 フェーズアウト (先端技術の導入、排ガスゼロでない新車の販売を2030年までに廃止)	<ul style="list-style-type: none"> 燃費向上と EV (主に BEV) の積極的展開。 ガソリンもしくはディーゼル ICE 車、HEV、PHEV の新車販売を 2030年までに廃止。

これらのシナリオは、ゼロカーボンでない車をフェーズアウト（段階的廃止）する速度によって分けられている。CPI シナリオは日本における現在の政治的議論の中心にある。従来のガソリンもしくはディーゼル ICE 車のみのフェーズアウトに言及し、ハイブリッドとプラグインハイブリッドの新車販売に関するフェーズアウト完了目標日を明確にしていないからである。さらに意欲的なシナリオ TECH2030 シナリオでは、対処可能な範囲でより速やかにフェーズアウトが行われた場合での動きにおける社会経済的な影響を予測している。

中核となるこれらのシナリオと並行して、今後の電力システムによって変わるシナリオごとの影響についても探っている。「中心的」な電力部門の確率変数において、電力需要の増加分は今日の日本における発電技術群に近いものによって対応されると想定している。「脱炭素化」の確率変数においては、電力部門が着実に脱炭素化されるという想定の下、乗用車の脱炭素化における影響を予測している。電気自動車の普及により、発電に伴う CO₂ の排出量は増加する。この影響に関しては第 7 章をご覧ください。

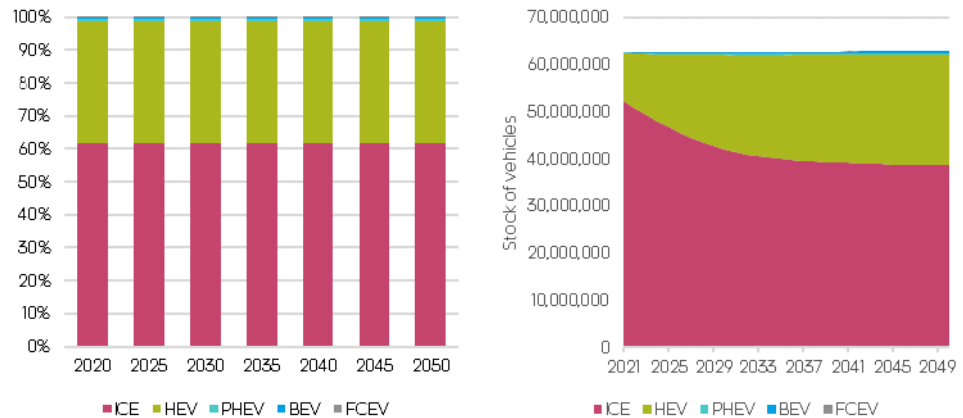
2.2 自動車販売と保有台数

このセクションでは、各シナリオで展開されるパワートレイン及び車体サイズによる規格ごとの販売構成をまとめている。

REF シナリオ

REF シナリオでは、予測期間中、主流は変わらずガソリンもしくはディーゼル ICE 車のままだが、新車の販売台数において 37%と HEV が大きな割合を占めている。販売構成比はずっと変わらないものの、車の買い替えにより日本の全体保有台数に占める HEV の割合は増加している。HEV の割合は、2040 年には 2020 年から 14%アップして 37%となっているが、BEV の割合は 0.6%と依然わずかである。図 2.1 が示すように、2050 年にはガソリンもしくはディーゼル ICE 車の割合は保有総数の 62%になるものの、PHEV と BEV の割合は 1%以下のままである。

図 2.1: REF シナリオにおける新車販売構成 (左) と保有台数構成 (右)

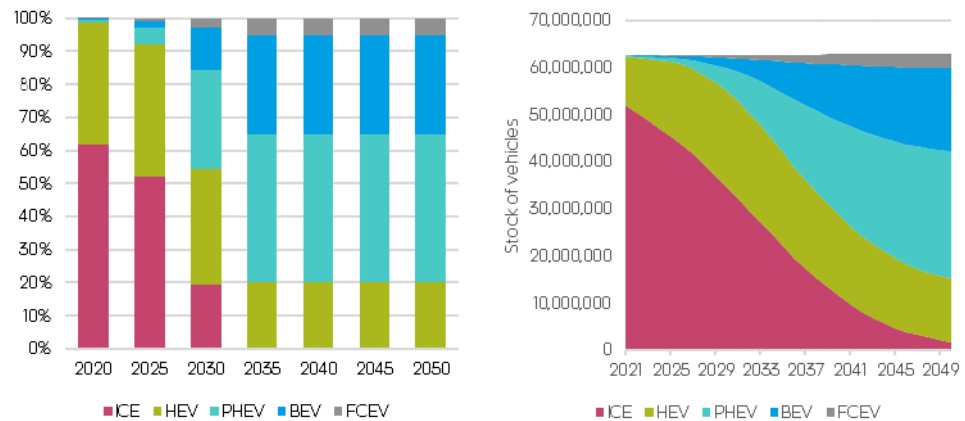


CPI シナリオ

CPI シナリオでは、2035 年までにガソリンもしくはディーゼル ICE の新車販売を廃止することを反映している。この目標を達成するために、新車販売において、PHEV と BEV がより大きな割合を占めると仮定するシナリオになっている。PHEV は BEV に比べて新しい充電インフラへの依存度が低いため、ガソリンもしくはディーゼル ICE 車から、ゼロカーボン車への移行における架け橋となり得る。新車販売に占める PHEV の割合は、2030 年までに 30%に、2035 年までに 45%に増加する。一方、BEV の普及速度は緩やかで、全体に占める割合は、2035 年までに 30%となる。乗用車部門における 2030 年代中盤 (このシナリオでは 2035 年と想定) 以降の CO₂ 排出目標が設定されていないため、それ以降の変化は予測していない (図 2.2 参照)。PHEV と BEV の新車販売台数を、全体保有台数に占める割合に換算すると、2030 年までにそれぞれ 8%と 3%となる。2050 年までに PHEV は保有台数の 43%を占めるようになるが、BEV は 30%に達しない。一方、長距離走行が可能な FCEV は 5%を達成する。2050 年には、ガソリンもしくはディーゼル ICE 車は全体保有台数の 3%ほどと少数ではあるが存在し、車齢 15 年以上のガソリンもしくはディーゼル ICE 車がまだ道路を走っている。

因みに、これは現在日本政府が掲げている目標に関する我々の解釈である。その目標は具体性に欠け、現在の政策が最終的にもたらすであろう結果が、実際より楽観的に見積もられている可能性がある。

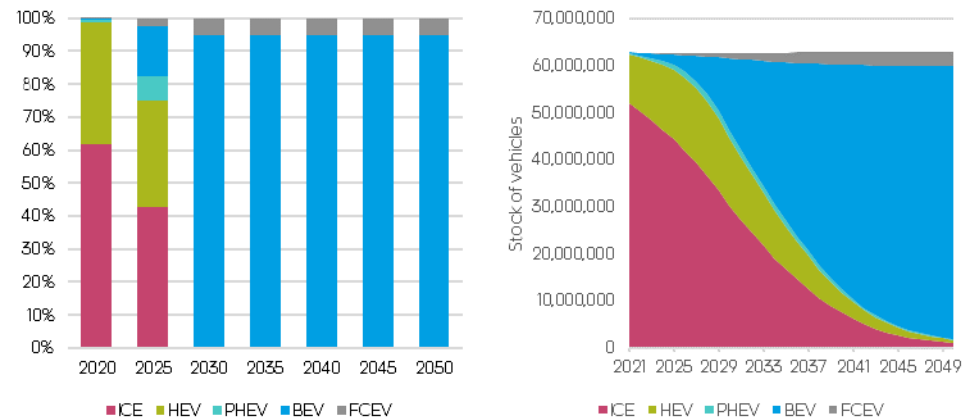
図 2.2: CPI シナリオにおける新車販売構成（左）と保有台数構成（右）



TECH 2030 フェーズアウト シナリオ

TECH2030 フェーズアウトシナリオにおける新車販売と保有台数の構成比は下図 2.3 に示す通りである。このシナリオでは、ガソリンもしくはディーゼル ICE の新車販売がフェーズアウトされる 2030 までに高度なパワートレインを搭載した自動車の割合が急増すると予測される。その後、BEV は新車販売の 95% を占めるようになり、主に長距離走行用として FCEV が残りの 5% を占める。2030 年以降は、構成比は変わらないが、全体保有台数に占める BEV の割合が急増し、2050 年には 93% に到達すると予測される（2030 年から 34% アップ）。ゼロカーボンでない車の早期フェーズアウトのお陰で、2050 年までにガソリンもしくはディーゼル ICE 車の割合は 1.4% に減少する。

図 2.3: TECH 2030 フェーズアウトシナリオにおける新車販売構成（左）と保有台数構成（右）



2.3 エネルギー需要

日本における乗用車に使用される燃料需要は、各車の構成で変わってくる。[日本国土交通省⁴](#)と[韓国エネルギー公団⁵](#)の報告にある試験サイクルの結果は、ゼロカーボンのパワートレインでは燃費率がより高いことを示している。CPI シナリオと TECH2030 フェーズアウトシナリオでは、新しい燃費向上技術を新車に搭載することを想定しているため、エネルギー消費は少ない。つまり、究極的には電力や水素燃料も含む燃料消費が少ないということになる。図 2.4 は、日本で保有されている自動車の燃料消費における燃費向上と、ゼ

⁴ [自動車燃費一覧](#)～2021年11月16日時点の情報

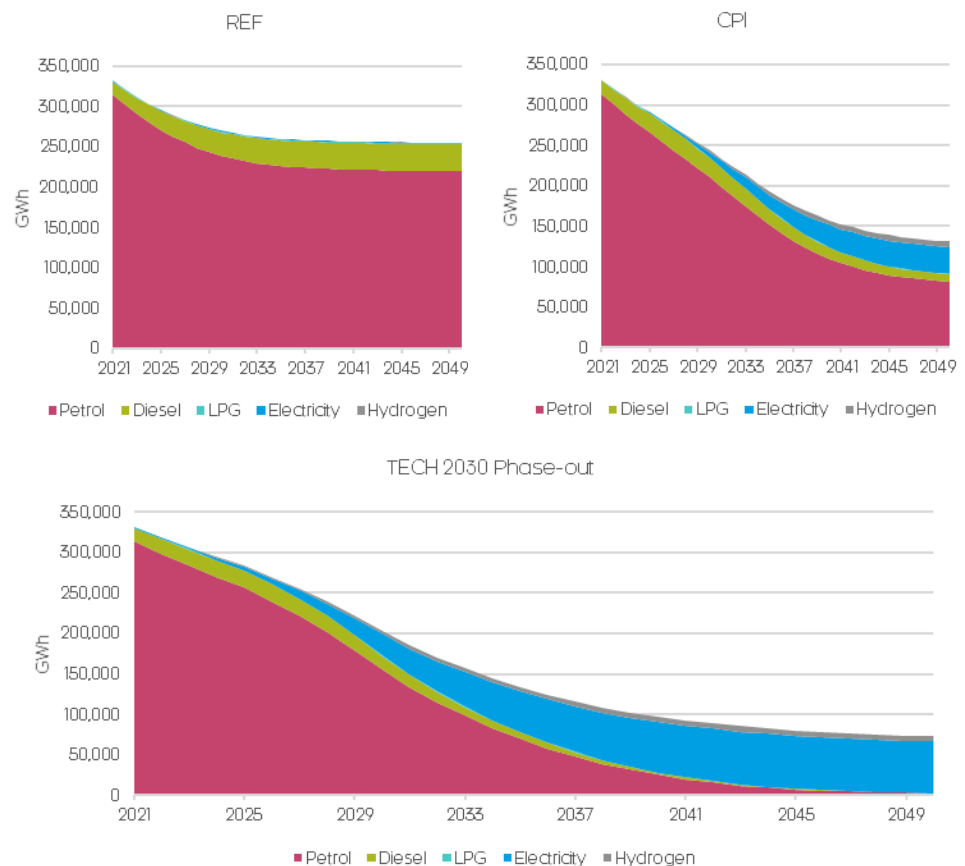
⁵ [自動車燃費分析レポート](#)～2021年11月16日時点の情報

ロカーボンのパワートレインの展開の複合効果を各シナリオで示している。2021年と比較し、年間燃料需要は確実に減少していく。基準となるREFシナリオでも2035年までに24%の減少が見込まれるが、これは新しいHEVが保有車数に占める割合の増加と燃費の良い車への買い替えによるものである。しかし、REFシナリオでは、更なる燃費向上は考慮されていないため、2035年以降の燃料需要は停滞する。

CPIシナリオとTECH2030フェーズアウトシナリオでは、2035年以降も全体的な燃料需要の大幅な減少が見込まれる。この減少は、主にガソリンと軽油の需要が大幅に減少するのに対し、電力需要の増加がわずかであることに起因する。両シナリオにおいて、2040年には、ガソリンと軽油の需要はREFシナリオにおける同時期の数値のそれぞれ51%と89%減少すると予測される。それ以降も2050年まで減少は続き、2021年と比較したガソリンと軽油の需要が、TECH2030フェーズアウトシナリオでは99%以上、CPIシナリオでは72%の減少が予測される。さらに、TECH2030フェーズアウトシナリオにおける、より迅速なガソリンもしくはディーゼルICE車、HEV、PHEVの新車販売のフェーズアウトは、予測対象期間の累積燃料需要がREFシナリオと比べて約40%（320万ギガワット時）、CPIシナリオと比べて21%（130万ギガワット時）減少することを意味する。

BEVとFCEVの普及に伴い、電気と水素の需要は増加する。しかし、優れた燃費性能により、全体のエネルギー需要に占めるBEVとFCEVの割合は、全体保有車数に占める割合よりも低くなる。

図 2.4 シナリオ別、ガソリン、軽油、LPG（液化石油ガス）、水素、電気（ギガワット時）の需要



3 モデル化における前提

このセクションでは、分析を裏付けるモデル化における前提について説明する。

用意したシナリオは、(i)パワートレインのタイプ別による新車販売構成、(ii)燃費向上技術の導入、(iii)予測される政策目標により定義されている。全シナリオに共通する主な前提は、表 3.1 に示す通りである。以降、セクションを追って、技術にかかるコストとその展開、バッテリーのコスト、燃料電池車、電力部門に関する予測について述べる。

3.1 モデル化における共通の前提

表 3.1: 自動車ストック型モデルで採用した主な前提

	Details of assumptions used
販売台数	<ul style="list-style-type: none"> 過去の販売記録は、日本自動車販売協会連合会と、全国軽自動車協会連合会から提供された統計データによるものである。 年間の新規登録数は、2019年に販売された新車台数に相当する440万台を維持している。2020年には大幅な落ち込みが見られたが、2021年には新規登録数は新型コロナウイルス流行前のレベルに戻ると推測される。
新車の燃費	<ul style="list-style-type: none"> 2006年から2019年の間に、日本で新車販売されたガソリンもしくはディーゼルICE車の燃費データの出典は、国土交通省である。 2016年から2019年の間に新規販売された、BEVとFCEVの燃費データの出典は、韓国エネルギー公団である。 今後販売される車の燃費は、自動車ストックモデルから得たもので、車に搭載されるパワートレインと燃費技術を基に、Ricardo-AEAが欧州委員会向けに作成したコスト分析曲線⁶を使って算出している。
車齢別の走行可能距離	<ul style="list-style-type: none"> 車体サイズ別の走行可能距離のデータの出典は日本交通政策研究会である。 年間の平均走行可能距離は、使用年数に応じて徐々に減少し、車体サイズとパワートレインによって幅があると推測される。燃料の種類と車齢による年間走行可能距離の予測には、TRACCSデータベースのデータを参照している。
車体寿命（使用可能年数）	<ul style="list-style-type: none"> 車体寿命を示す曲線グラフは、年間販売台数を保有台数に換算することに基づいている。この曲線は、特定の耐用年数を持つ販売車群からの車両の割合で定義される。 車体寿命は、自動車検査登録情報協会から提供された、2020年の車齢別登録数と登録抹消数より算出している。2020年、日本における平均車齢は8.4年だった。 同じ使用可能年数の値は、すべてのパワートレインと車体規格に適用される。すべてのタイプにおける平均使用可能年数の曲線と全期間の使用可能年数の曲線を予測している。
燃料の価格	<ul style="list-style-type: none"> 過去の燃料価格に関するデータの出典は、資源エネルギー庁である。この調査では燃料の価格は、ガソリンと軽油で分けられている。

⁶ Ricardo -AEA (2016)は、2030年までに自動車からのCO₂排出削減のために必要な技術とコストを分かりやすく、費用曲線で示している。

水素燃料の価格	<ul style="list-style-type: none"> 水素燃料の価格は水素協議会 2020 が発表した 2030 年までの予測を基にしている。以降の水素の価格は不確かなため、2030 年以降の価格変動はないと仮定している。
バリューチェーン	<ul style="list-style-type: none"> 全シナリオにおいて、従来のガソリンもしくはディーゼル ICE 車の自動車バリューチェーンにおける日本のシェアは変わらないと想定している。 バッテリーモジュールとバッテリーパックの組み立ては、電装品のバリューチェーンの一部とみなす。中心的なシナリオでは、EV のバッテリーモジュールとバッテリーパックは、現在国内生産で賄われている電装品の需要のシェアに比例して国内で組み立てられると想定する。
自動車の輸出	<ul style="list-style-type: none"> 自動車の脱炭素化は、全世界で同様のペースで進んで行く想定している。 したがって、日本車の輸出需要に変化はない。
大気環境	<ul style="list-style-type: none"> 新規登録された乗用車の登録年ごとの NOx 及び PM の排出係数に関する情報は、国土交通省より取得している。

3.2 ICE の燃費向上

内燃エンジンとトランスミッションシステムの効率を向上させる技術では、今後導入される可能性があるものが多くある。そして、すでに導入されている技術の多くが、2021 年から 2025 年の間の燃費に大きな影響を与えることが考えられる。

表 3.2 と表 3.3 は、TECH2030 フェーズアウトシナリオにおいて、ガソリンもしくはディーゼル ICE 車に燃費技術が積極的に導入された場合を想定している。これは、英国気候変動委員会（CCC）のために Ricardo AEA が作成した、展開スケジュールを基にしている。この展開は技術パッケージを生み出すために使われ、こうしたパッケージは徐々に中心的に活用される技術を代表するものとなる。これらの技術は、補足的な技術が同時に新車に導入されるよう分類されている。これら技術パッケージが新車に搭載されるようになると、新車全体の燃費が次第に向上していく。我々は、設定したシナリオにおける特定の目的達成のために、このパッケージ展開について微調整を加えている。例えば、内燃エンジンの燃焼効率を向上させる技術改良は、レベル 1、レベル 2、レベル 3 の 3 カテゴリーに分類している（表 3.2 の最初の 3 列を参照）。レベル 1 のパッケージは、2020 年に新車の 80% に搭載された。この展開は急速に進み、2030 年までに全ての新車に搭載されると推測される。しかし、レベル 2 とレベル 3 の改良は、同じエンジンの構成部分を使っているため、同時に新車に展開できない（しかし、レベル 2 よりレベル 3 の方がコストはかかるがより大幅な燃費向上が見込める）。つまり、車によって、レベル 2 とレベル 3 のどちらかのみが展開される。レベル 2 は、初期段階ではほとんどの車に搭載されると予測される（2030 年までに新車の 82% 程度）。しかし、後年さらに改良が加えられ、レベル 2 は過去のものとなり、レベル 3 に置き換わることになる。そして、2050 年には 78% がレベル 3 を搭載し、残りの 22% のみがレベル 2 のままとなる。

例えば、パワートレインの効率よりも車体に作用する技術や措置などについて適用可能な場合は、燃費技術も、他のパワートレインの車に同等に搭載されている前提としている。

表 3.2 2050 年までのガソリン ICE 車における燃費技術の展開（新車に搭載されている割合）

燃費技術	2020	2030	2050
エンジンの燃焼性能の改善：レベル 1	80%	100%	100%
エンジンの燃焼性能の改善：レベル 2	33%	82%	22%
エンジンの燃焼性能の改善：レベル 3	0%	7%	78%
直噴式～均質燃焼	40%	36%	1%
直噴式～層状給気及び希薄燃焼	20%	54%	51%
熱力学サイクルの改善	1%	4%	47%
気筒休止システム	1%	2%	1%
小規模なダウンサイジング（シリンダー容量を 15%削減、ターボ搭載）	51%	27%	0%
中程度のダウンサイジング（シリンダー容量を 30%削減、ターボ搭載）	29%	60%	22%
大幅なダウンサイジング（シリンダー容量を 45%以上削減、ターボ搭載）	4%	13%	78%
EGR 低圧 EGR クーラー	20%	60%	99%
カム位相調整	60%	27%	0%
連続可変バルブリフト機構	33%	73%	54%
エンジン摩擦軽減 レベル 1	65%	34%	0%
エンジン摩擦軽減 レベル 2	20%	66%	100%
アイドリングストップシステム	36%	17%	0%
オートマチックマニュアルトランスミッション（セミオートマチック、AMT）	25%	47%	2%
デュアルクラッチトランスミッション（DCT）	6%	27%	20%
連続可変トランスミッション（CVT）	3%	12%	78%
ギア比・減速比の最適化	4%	2%	0%
変速機の更なる最適化、ギア段数を 6 速から 8 速以上に増加	30%	64%	99%
車両の軽量化（車両重量の 10%）	2%	1%	0%
車両の軽量化（車両重量の 20%）	48%	34%	1%
車両の軽量化（車両重量の 30%）	21%	66%	100%
エアロダイナミクスの改善（Cd 値を 10%低減）	20%	40%	2%
エアロダイナミクスの改善（Cd 値を 20%低減）	10%	36%	18%
低転がり抵抗タイヤ 1	2%	10%	81%
低転がり抵抗タイヤ 2	45%	36%	2%
ドライブラインの摩擦軽減 1	37%	64%	99%
ドライブラインの摩擦軽減 2	23%	20%	0%
低摩擦ブレーキ	28%	80%	100%
熱管理	36%	47%	0%
熱電廃棄物からの熱回収	12%	53%	100%
熱管理に関連した補助システムの改善	8%	27%	83%
その他の補助システムの改善	29%	60%	99%

表 3.3 2050 年までのディーゼル ICE 車における燃費技術の展開（新車に搭載されている割合）

燃費技術	2020	2030	2050
エンジンの燃焼性能の改善：レベル 1	80%	100%	100%
エンジンの燃焼性能の改善：レベル 2	33%	82%	22%
エンジンの燃焼性能の改善：レベル 3	0%	7%	78%

小規模なダウンサイジング（シリンダー容量を 15%削減、ターボ搭載）	51%	27%	0%
中程度のダウンサイジング（シリンダー容量を 30%削減、ターボ搭載）	29%	60%	22%
大幅なダウンサイジング（シリンダー容量を 45%以上削減、ターボ搭載）	4%	13%	78%
EGR 低圧 EGR クーラー	20%	60%	99%
連続可変バルブリフト機構	33%	73%	54%
エンジン摩擦軽減 レベル 1	65%	34%	0%
エンジン摩擦軽減 レベル 2	20%	66%	100%
アイドリングストップシステム	36%	17%	0%
オートマチックマニュアルトランスミッション（セミオートマチック、AMT）	4%	2%	0%
デュアルクラッチトランスミッション（DCT）	30%	64%	99%
連続可変トランスミッション（CVT）	2%	1%	0%
ギア比・減速比の最適化	48%	34%	1%
変速機の更なる最適化、ギア段数を 6 速から 8 速以上に増加	21%	66%	100%
車両の軽量化（車両重量の 10%）	20%	40%	2%
車両の軽量化（車両重量の 20%）	10%	36%	18%
車両の軽量化（車両重量の 30%）	2%	10%	81%
エアロダイナミクスの改善（Cd 値を 10%低減）	45%	36%	2%
エアロダイナミクスの改善（Cd 値を 20%低減）	37%	64%	99%
低転がり抵抗タイヤ 1	23%	20%	0%
低転がり抵抗タイヤ 2	28%	80%	100%
ドライブラインの摩擦軽減 1	36%	47%	0%
ドライブラインの摩擦軽減 2	12%	53%	100%
低摩擦ブレーキ	8%	27%	83%
熱管理システム	29%	60%	99%
熱電廃棄物からの熱回収	0%	4%	25%
熱管理に関する補助システムの改善	32%	87%	100%
その他の補助システムの改善	20%	53%	91%

3.3 車両コスト

上記の燃費向上技術にかかるコストの予測は、Ricardo-AEA (2015)に基づいている。表 3.4 に示すコストは、欧州委員会のために作成された最新の Ricardo-AEA (2015)から引用されたデータである。この表には、採用される主要技術、結果としてもたらされるエネルギー消費量の削減率、及びコストの増加をまとめている。

表 3.4 技術別の燃費向上率とコスト

燃費技術	燃費向上率	製造コスト（単位：US\$、2021 年の為替）	
		軽自動車	Ordinary & Small car
エンジンの燃焼性能の改善：レベル 1	2-3%	77	77
エンジンの燃焼性能の改善：レベル 2	2-3%	16	17
エンジンの燃焼性能の改善：レベル 3	2-7%	611	611
直噴式～均質燃焼	5%	277	277
直噴式～層状給気及び希薄燃焼	7-11%	570	750

熱力学サイクルの改善	13-25%	689	698
気筒休止システム	2-3%	303	303
小規模なダウンサイジング（シリンダー容量を15%削減、ターボ搭載）	2-3%	126	166
中程度のダウンサイジング（シリンダー容量を30%削減、ターボ搭載）	2-7%	214	315
大幅なダウンサイジング（シリンダー容量を45%以上削減、ターボ搭載）	8-10%	505	582
EGR 低圧 EGR クーラー	2-3%	133	143
カム位相調整	4%	95	100
連続可変バルブリフト機構	1-7%	266	280
エンジン摩擦軽減 レベル 1	1-2%	68	68
エンジン摩擦軽減 レベル 2	3-3%	128	128
アイドリングストップシステム	1-2%	152	174
オートマチックマニュアルトランスミッション（セミオートマチック、AMT）	1-2%	498	498
デュアルクラッチトランスミッション (DCT)	1-2%	527	562
連続可変トランスミッション (CVT)	2-3%	1,027	1,027
ギア比・減速比の最適化	1-5%	93	93
変速機の更なる最適化、ギア段数を6速から8速以上に増加	3-9%	176	176
車両の軽量化（車両重量の10%）	5-7%	46	60
車両の軽量化（車両重量の20%）	11-12%	279	361
車両の軽量化（車両重量の30%）	17-19%	1,176	1,528
エアロダイナミクスの改善（Cd 値を10%低減）	3-4%	62	64
エアロダイナミクスの改善（Cd 値を20%低減）	5-7%	195	202
低転がり抵抗タイヤ 1	2-4%	44	51
低転がり抵抗タイヤ 2	5-8%	123	130
ドライブラインの摩擦軽減 1	1%	33	33
ドライブラインの摩擦軽減 2	2%	147	147
底摩擦ブレーキ	1%	84	84
熱管理システム	2%	257	257
熱電廃棄物からの熱回収	2-3%	743	743
熱管理に関する補助システムの改善	2-3%	155	164
その他の補助システムの改善	2-3%	234	252

注: コストは大量生産の場合

3.4 バッテリーのコストと航続距離

定義 EVにかかるコストのモデル化では、バッテリーパックのサイズ（kWh:キロワット時）がポイントとなる。今後のバッテリーパックのサイズは、バッテリーのコスト削減率と、顧客の選好に基づく、コストに対する航続距離のバランスを取るための OEM の設計選択変わってくる。現在、最小サイズの BEV 用バッテリーは 30kWh で、最大のものは 100kWh である。OEM の発表によれば、BEV の普通車と小型車では、航続距離 300km 以上を目標にしている。これらの点を考慮し、表 3.5 では、2021 年から 2050 年の間の PHEV と BEV の乗用車のバッテリーパックのサイズを予測している。

表 3.5: バッテリーパックサイズの予測

バッテリーサイズ (kWh)					
パワートレイン	分類	2021	2030	2040	2050
PHEV	軽自動車	7.0	6.3	5.6	4.9
PHEV	普通車、小型車	10.0	9.0	8.0	7.0
BEV	軽自動車	45.0	45.0	45.0	45.0
BEV	普通車、小型車	60.0	60.0	60.0	60.0

バッテリー容量に関しては、PHEVとBEVでは違う道を辿ると予測される。PHEVでは、OEMは普通車と小型車用に1回の充電で約50kmの航続距離のものを提供し続け、燃費向上に伴い1キロあたりに使う電力が減るため、バッテリーパックのサイズは徐々に小型化していく。BEVでは、バッテリーパックのサイズは変わらず、エネルギーの高密度化がバッテリーパックの軽量化を実現し、自動車全体の燃費向上により、キロあたりの消費電力が低減されるにつれ、航続距離が長くなっていく。

ここで取り上げるバッテリーサイズは代表的なものである。実際は、メーカーによりオプションと仕様は様々で、コスト、性能、航続距離に大きな幅がある。

コストと省エネ

プラグイン電気自動車のコストと性能を左右する一番の要素はバッテリー技術である。電気モーターのような他の装置はすでに十分な開発が進んでいるので、今後のさらなる進歩の可能性は限られている。急展開につながるバッテリー技術の要素は、主に以下の4つに分けられる。

- コスト軽減
- 比エネルギーの増加（一定のバッテリー重量で車の航続距離や性能を向上させる、もしくは一定のバッテリーkWh容量で軽量化できるように）
- 耐用年数の改善
- 充電時間の低減。例えば、バッテリーを劣化させることなく150kW以上で高速充電が可能など。

ブルームバーグ・ニュー・エナジー・ファイナンス（BNEF）の2021年の報告⁷によれば、2020年のリチウムイオンバッテリーの価格は2010年より89%下がり、\$137/kWhとなっている。2010年と2020年の差は、ある程度は技術の進歩とスケールメリットに起因するものである。今後、2020年までのように急激ではないものの、バッテリーパックの価格はさらに低下すると予測される。

検討されたシナリオはすべて、BEFが2021年に発表した、バッテリー1台あたりのコスト予測に基づいている。予測では、2030年までにバッテリーの価格は約\$58/kWhまで下がるとされている、2050年までの予測が立てられていないことから、2030年以降の価格変動は想定していない。これにより、2030年以降のバッテリー価格の見通しは悲観的となっている。表3.6は、PHEVとBEVのバッテリーのコストの予測を示している。

表 3.6: バッテリーシステムのコスト予測

バッテリーシステムのコスト (単位: kWh あたりの US\$, 2021 年の為替相場による)					
パワートレイン	分類	2020	2030	2040	2050
HEVs, PHEVs, BEVs	全車	126	54	54	54

表 3.6 が示すコストは、バッテリーとバッテリーシステム（パック）に関してで、電気駆動パワートレインについてはここでは言及していない。そちらについては表 3.7 を参照されたい。kWh あたりのコストは、小型のバッテリーより大型のバッテリーの方が低いことがわかる。

表 3.7: 電動パワートレインのコスト予測 (モーター、インバータ、ブースター) (単位: US\$, 2021 年の為替相場)

パワートレイン	分類	2020	2030	2040	2050
PHEV	軽自動車	1,034	932	842	762
PHEV	普通車、小型車	1,164	1,050	948	858
BEV	軽自動車	1,034	932	842	762
BEV	普通車、小型車	1,164	1,050	948	858

表 3.8 では、バッテリーシステムとパワートレインにかかるコスト総額が、搭載されるバッテリーサイズが決まる車体規格ごとに示されている。

表 3.8: 電動パワートレインとバッテリーのコスト合計 (単位: US\$, 2021 年の為替相場)

パワートレイン	分類	2020	2030	2040	2050
PHEV	軽自動車	1,922	1,271	1,143	1,026
PHEV	普通車、小型車	2,434	1,534	1,378	1,234
BEV	軽自動車	6,748	3,351	3,261	3,181
BEV	普通車、小型車	8,782	4,275	4,173	4,083

航続距離

表 3.9 で予測を示している充電状態とは、完全充電された状態から放電した電気量を除いた残りの割合で、事実上使用可能なバッテリーのエネルギー量のことである。表 3.10 で示す航続可能距離は、WLTP の定める試験サイクルでの EV モードの燃費を基に割り出されたものである⁷。

表 3.9: バッテリー充電状態 (SOC)

使用可能なバッテリー充電率 (%)					
パワートレイン	分類	2020	2030	2040	2050

⁷ NEDC の下で計測された燃費は、Ricardo-AEA (2015) に示された測定方法に応じて、WLTP に換算されている。2015 年の立ち上がり換算率は ADAC エコテストの結果によるものである。NEDC と WLTP における kWh/km の差は 5% 程度である。

PHEV	軽自動車	70%	72%	74%	75%
PHEV	普通車 小型車	70%	72%	74%	75%
BEV	軽自動車	85%	90%	90%	90%
BEV	普通車 小型車	85%	90%	90%	90%

表 3.10:電気走行のみによる航続距離

電気走行の航続距離 (km – WLTP)					
パワートレイン	分類	2020	2030	2040	2050
PHEV	軽自動車	47	47	45	46
PHEV	普通車 小型車	52	52	50	51
BEV	軽自動車	300	342	361	412
BEV	普通車 小型車	308	350	371	424

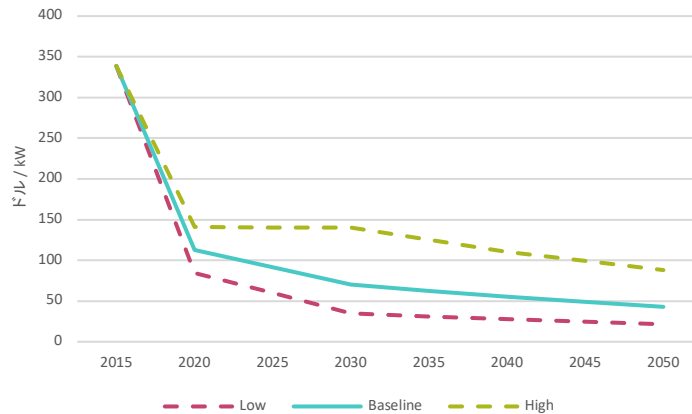
3.5 燃料電池自動車

燃料電池システム、水素タンクのコスト、航続距離、電力量、水素生成のコストといった FCEV に関する予測は、水素モビリティへの国家的な取り組みをサポートするコンサルタント会社 Element Energy 及び燃料電池水素共同実施機構 (Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking) が立ち上げた横断的な実証プロジェクト、欧州水素モビリティ (Hydrogen Mobility Europe もしくは H2ME) による調査分析を基にしている。これは、技術サプライヤーと自動車メーカーから匿名で集められたデータ、実際の展開状況から得られたデータ、水素モビリティの国家的な取り組みと学術調査より公表されたデータに基づいている。

燃料電池システム と水素タンクのコスト

FCEV のコストを左右する二大要素は、燃料電池システムと高圧水素タンクである。これらのコストは今後、技術の進歩 (燃料電池スタックに使われる貴金属の割合の軽減など) と、生産量の大幅な増加で大きく変わってくるため、不安定である。我々の分析では、従来の見方により価格を予測しているが、業界からの最新情報によれば、燃料電池の耐用年数が改善され、燃料電池システム市場はもっと急速な展開を見せる可能性がある。現状は、生産量がわずかであることもあり、燃料電池のコストは概ね \$113/kW と見積もられている。

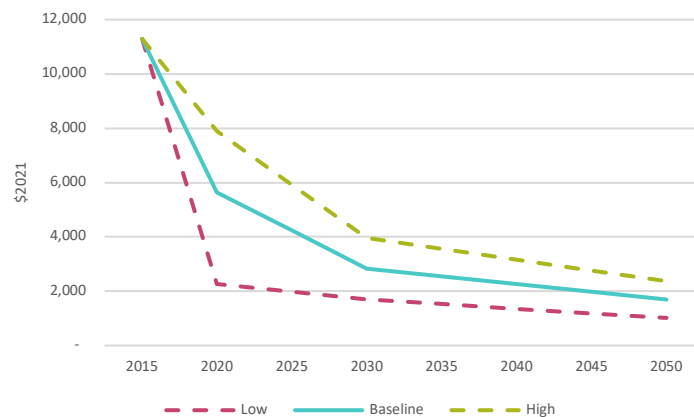
図 3.1: 現在までと今後の燃料電池システムのコスト推移 (ドルは 2021 年の為替相場)



2021 年以降には、技術の進歩と生産量の増加により、燃料電池システムの大幅なコスト削減が見込まれる。今後の見通しは、Element Energy と The Carbon Trust が行った欧州パワートレイン調査 (EU Powertrains Study) 及び UK 水素技術イノベーションニーズ評価 (UK TINA) をベースに立てられている。これによれば、2030 年には、100kW の燃料電池システムのコストが、\$5,000~\$6,000 となると予測されている。

図 3.2 は、水素タンクのコスト削減の見込みを示している。これは自動車メーカー間の意見交換と UK TINA をベースに予測したものである。燃料電池同様、製造量の増加により、2030 年までに少なくとも現在の半分までコストの大幅な削減が期待できる。

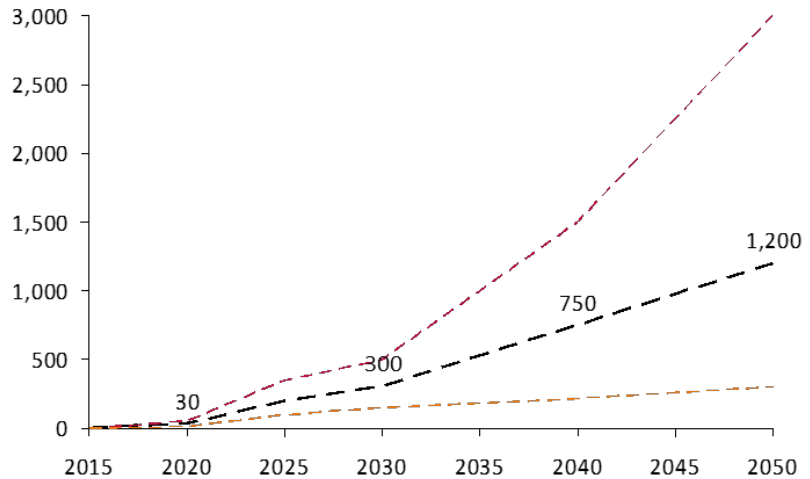
図 3.2: 高出力の燃料電池乗用車用水素タンクのコスト予測の推移 (単位: US\$、2021 年の為替相場)



TINA が見積もった燃料電池と水素タンクのコストの最大値と最小値は、図 3.3.に示す、システムメーカー各社による予測販売数の増減幅を反映した感度分析にも提供されている。

図 3.3 全世界における燃料電池システムとタンクのメーカー別年間生産量予測 (単位：千台)

FC systems and tank production
per manufacturer per year (thousands)



航続距離及びシステムの出

現在、FCEV が 1 回の燃料補給で走れる平均航続距離は約 500km である。これは、現世代のバッテリー式 EV よりも長い距離である。航続距離及びモーターと燃料電池の出力の予測は、表 3.11 に示す通りである。燃料電池のコストダウンと燃費向上に伴い、自動車メーカーは、航続距離を延ばすか、航続距離は一定に保ち水素タンクの小型化を図る可能性がある。これは燃料電池とモーターの出力にも当てはまることで、メーカーは、性能向上につながる出力アップを犠牲にして特定の性能に関わるコスト削減を図ることがある。これらの選択は、今後の顧客ニーズと、技術の進歩で変わってくる。同じようなトレードオフは、航続距離が長い燃料電池ワゴン車にも起こり、各技術における今後のコスト削減率が、バッテリーと燃料電池スタックのサイズ最適化を左右していく可能性がある。

予測を簡潔にするために、分析期間中はモーターと燃料電池の出力は、一定だと仮定している。これは、現在より消費者の負担（車体購入や維持）総額を減らすために、性能を上げるための技術向上よりも、コスト削減を目指すメーカーの意向とも一致している。燃料タンクサイズは変わらないと想定しているため、いかなる燃費向上も航続距離を延ばすことにつながる。この航続距離の増加は、Hyundai が最近プロトタイプを発表した 1 回の燃料充填で 609km 走行できる Nexo に近い。また、ディーゼル車に近い航続距離が求められていることも反映している。また、バッテリー式 EV が長距離を走るために必要な負荷サイクルに比べ、燃料充填時間が 5 分以下であるというメリットがある。

表 3.11 水素燃料車における航続距離、及びモーターと燃料電池システムの出力のモデル化による予測

分類	年	航続距離 (km)	電動モーター出力 (kWh)	燃料電池システム出力 (kWh)
軽自動車	2020	399	70	70

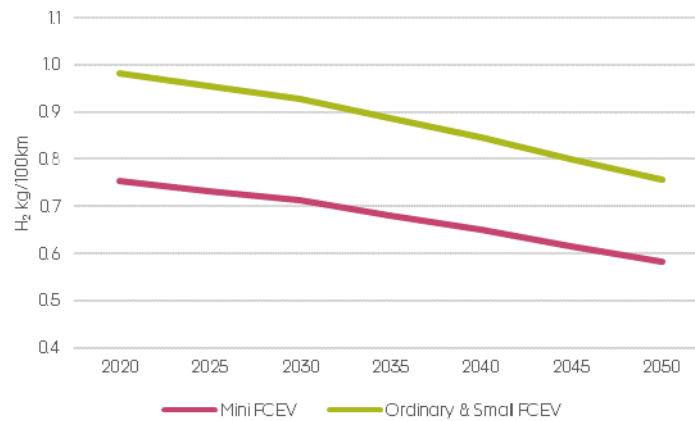
軽自動車	2050	515	70	70
普通車、小型車	2020	509	100	100
普通車、小型車	2050	662	100	100

水素燃料の消費量

FCEVの燃料消費量予測は、韓国エネルギー公団より提供された2019年のデータによる（データが入手可能で、日本に一番近い状況の例として韓国を採用）。今後の燃料消費量の変化は、自動車ストック型モデル内で算出されている。今後開発される燃料自動車のモデルでは、燃料消費量は低下すると予測される。それは、ある程度は燃料電池の効率アップによるものであるが、車体の軽量化やエアロダイナミクスの改善といった車体レベルでの効率アップにも起因している。

図3.4はFCEVの軽自動車、普通車及び小型車の燃料消費量の推移を示している。燃料消費量は、燃費向上を反映して着実に低下していく。

図 3.4 FCEV の軽自動車、普通自動車及び小型車の燃料消費予測 (H₂ kg/100km)



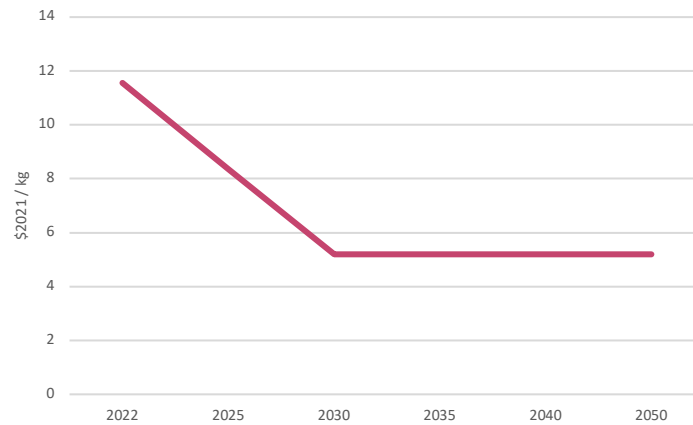
水素燃料の価格

水素燃料の製造量は大幅に増加し、全世界で価格が低下すると考えられる。現在、水素燃料の製造には水蒸気メタン改質（SMR）と電気分解の2つの主要技術が使われている。SMRは大幅なコストダウンが実現できるものの、製造に大量のCO₂排出が伴う。しかし、排出ガスは二酸化炭素回収貯留（CCS）技術を使って9割減らすことが可能である。CCSを採用した水蒸気メタン改質で製造された水素は、ブルー水素と呼ばれる。一方、再生可能エネルギーを使って電気分解によって製造した水素は、CO₂の排出がゼロである。

図3.5は、水素協議会2020（[Hydrogen Council \(2020\)](#)）による水素燃料の平均小売価格の予測である。この価格には、水素燃料サプライチェーンの製造（2030年には\$2.2/kgの予測）、精製、輸送、供給ステーションの全コストを含む。予測は2030年までのみのもので、以降の水素燃料の価格変動に関しては予測に信憑性を持たせられないため、価格は変わらないと仮定している。実際は、2030年以降も価格は更に低下すると考えられる。しかし、信頼できる予測材料に欠けるため、一定線とした。それでもFCEVは全体の保有乗用車数に占める割合が低いため、社会経済的分析に大きく影響はしない。

これは日本に特化した価格の予測ではないが、[Hydrogen Council \(2020\)](#)が提示した\$13.15という短期価格予測は可能性の高い数値と判断し、これに基づいて予測を行った。

図 3.5 Hydrogen Council (2020)による水素燃料の価格予測 (US\$/kg、2021年の為替相場)



3.6 電力部門における予測

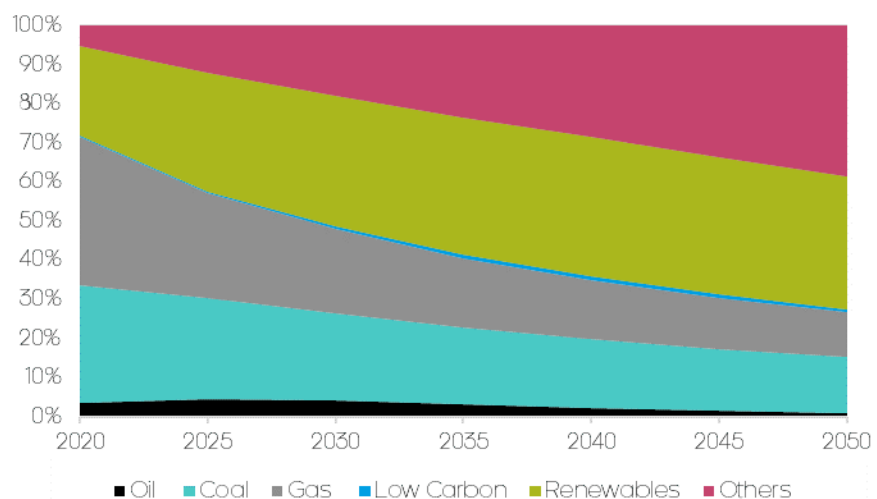
電力部門の構造、中でも発電における再生可能な要素は、以下のように分析結果に大きく作用する。

- 自動車の電動化における環境への総合的な影響を決定する。
- 脱炭素化における経済及び雇用への影響を左右する。

電力部門の構造

この分析では、2050年までの日本の電力産業における展開に関し、2つのシナリオを想定した。このシナリオは、我々の電力部門モデル FTT:Power を使って設定している。このモデルは、異なる技術における拡散動力学と相対価格に基づいて、将来の電力システムを予測する。異なるシナリオをモデル化するため、電力部門における技術展開の進路を変えて様々なインプットを試みた。これは、第7章で述べる社会経済的な影響にも関係してくる。すなわち、発電における構成比の違いにより、最終的に消費者が負担する電気代は変わりうるのである。モデルの反復的な特性から、我々のシナリオは、現存する公表資料から情報を得て設定されているが、FTT:Powerによる電力部門モデルは、そういった資料と全く同じものではない。むしろ我々は、すでに発表されているものを踏まえた結果に広く結びつく予測を提示している。

図 3.6: 「中心的」シナリオにおける燃料別年間発電量 (発電総量に占める割合)



石油、石炭、天然ガス、低炭素燃料、再生可能燃料、その他

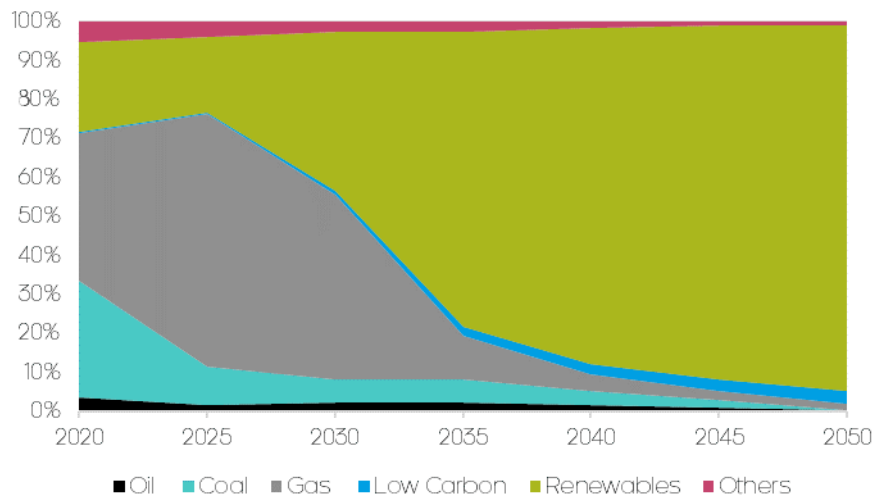
「中心的」シナリオでは、発電構成比は、2021年9月発表の[第6次エネルギー基本計画](#)に概ね基づいている。図3.6に示すように、予測対象期間中、発電構成が大きく多様化することはない。したがって、このシナリオは発電部門における明確な脱炭素化を予測していない。

一方、「脱炭素化」シナリオでは、発電構成比は自然エネルギー財団の[2030年及び2050年脱炭素化計画](#)を広範囲に踏まえている⁸。このシナリオでは、2050年までに日本で化石燃料（石炭、石油、天然ガス）による発電を廃止するための新たな政策が導入されると仮定している。したがって、図3.7に示すように発電構成は、この期間に大きく変化する。

再生可能なエネルギーは、発電の脱炭素化において重要な役割を果たす。原子力発電（「その他」に分類）はこの期間中減少し続ける。しかし、再生可能エネルギーに依らない、他の配送可能な「低炭素」源による発電がわずかに残る。これは、インタコネクタを使った電力の引き込みや、低炭素燃料（燃料電池に使用される水素など）の輸入や、おそらく最も望ましくないがCCS技術の採用などでカバーしうるものである。

発電部門が「脱炭素化」シナリオにおいて、再生可能なエネルギー源への移行を実行すれば、道路輸送部門で検討されたシナリオの経済と雇用への影響が直接変わってくる。この影響に関しては第7章で詳しく述べる。

図 3.7: 「脱炭素化シナリオ」における燃料別年間発電量（総発電量に占める割合）



石油、石炭、天然ガス、低炭素燃料、再生可能燃料、その他

⁸ 自然エネルギー財団の試算に基づいているけど、本レポートで利用されている数値と異なります

4 インフラ整備要件

このセクションでは、充電スポットの定義、コスト、配備及び水素供給ステーションの配備について言及する。我々が算出したインフラ整備にかかるコスト総額の内訳も提示する。

4.1 EVのインフラ

EV充電スポットの定義とコスト

充電スタンドに関する定義とコストには、このセクションで提示されているものを適用する。これは Cambridge Economics や CE Delft などが近年作成した資料を参照し、日本の市場を反映したものである。

表 4.1 はエンドユーザーが使用できる充電スポットの種類と各スポットの特徴及びコストを示している。実際には、各タイプにおける価格と特徴はかなり多様化することが予測される。

表 4.1: 充電スタンドの定義とコスト

主要用途	特徴	出力 (kW)	平均充電時間 (45kWh バッテリーの 場合)	コスト
				製造、設置費用 (単位: US\$、 2021年の為替 相場)
住居用	電源ボックス 1プラグ	3 kW	15 時間	1,501
オフィス用	地上設置 2プラグ	7 kW	6.4 時間	3,725
駐車場 (街中、ショッ ピングモール)	地上設置 DC 急速発電	50 kW (2台で 同時充電の場合 は 25 Kw)	54 分 (25 kW 時は 1.8 時間)	35,557
高速道路のサー ビスエリアにお ける高速充電	DC スーパーチ ャージャー	150 kW (2台で 同時充電の 場合は 75kW)	18 分 (75kW 時は 36 分)	75,207

自宅充電

住居用には、標準仕様として一晩かけてゆっくり充電できる出力 3 kW の電源ボックスを想定している。このソリューションは独自ブランドの充電スタンドを提供する OEM デイラーによって、もしくは独立したプロバイダーとの契約によっても提供されることがある。場合によっては、消費者は容量電力料金の負担を避け、充電ボックスを設置する代わりに、普通のコンセントによる充電を選択するケースも出てくる。

私設車道やガレージがない住居の場合、充電量に応じて料金を支払い、許可されたユーザーだけが使用できるオプション付きの自宅用充電スタンドに類似したソリューションを適用できる。職場環境では、オフィスの駐車場に、就業時間中に緩やかに充電できる 7 kW の充電スタンドを地上設置することを想定している。

公共の充電スタンド

路上の駐車スペース、施設などの専用駐車場、コインパーキングといった公共の場所における充電スタンドには、50kWのDC急速充電器（2台で同時充電した場合は25kW）の地上設置を想定している。スタンドを設置する際、その出力は駐車時間（コインパーキングでは駐車時間がより長い傾向にあるので、低い出力でも、ある程度の充電が可能である）や接続費用などのパラメーターで決められる。

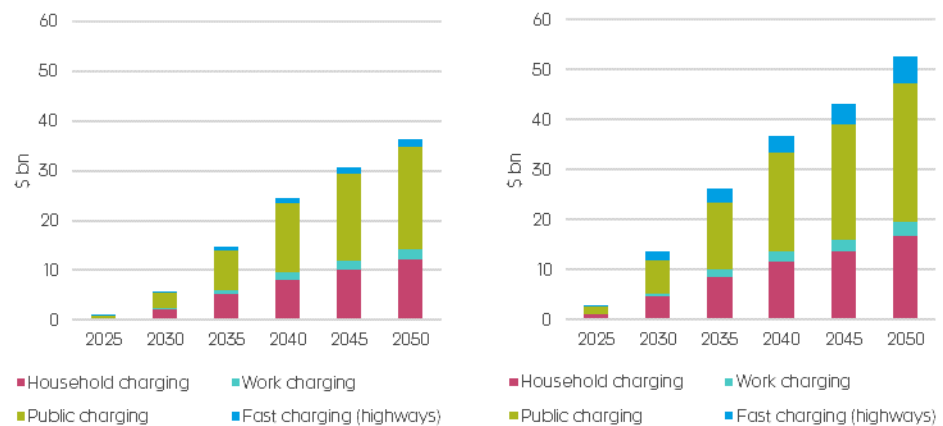
急速充電スタンド

高速道路の充電ステーションでは、150kW（2台で同時充電した場合は75kW）の超高速充電器の設置が想定される。18分から36分で45kwhバッテリーパックを搭載したBEV1台分のフル充電が完了するものである。また、大容量バッテリーを搭載した車の充電時間を許容範囲に抑えるために、必然的に電気料金は高くなる。

充電スタンドの設置費用

各年に追加される充電要件は、その年のスタンド1台あたりにかかったコストにより増えていく。2050年までの充電インフラにかかる費用の推移を予測するにあたり、累積充電能力が倍になるごとに10%の学習率を適用している。つまり、設置された充電器全体の能力が倍増すると、追加された充電器のコストは10%削減されるということである。製造技術の進歩とスケールメリットにより、製造コストは削減されることが予測される。よって、実際のコストはシナリオにより違ってくる。図4.1はCPIシナリオとTECH2030フェーズアウトシナリオにおける、EVをサポートするために必要な累積投資額を示している。

図 4.1 CPI シナリオ (左) と TECH 2030 フェーズアウトシナリオ (右) における EV のサポートに必要な累積投資額推移 (単位: US\$, 2021 年の為替相場)



個人向けのすべてのインフラ（家庭やオフィスに設置する充電スタンド）は、車の購入時に消費者によって先行投資されると考えられる。これは消費者が自費で私有の敷地内に充電器を設置するという明快なケースと、OEMが車の販売の一端として設置し、その分を車体価格に上乗せして販売するという暗黙的なケースがある。一方、公的インフラと急速充電スタンドの設置における出資は、ショッピングモールや駐車場、高速道路のサービスエリアのオーナーが負担すると考えられる。これらのコストはそのまま消費者の負担に置き換わると考えられる。ショッピングモールと高速道路のサービスエリアにおけるインフラのコストは、最終的には、卸売と小売市場における価格の上昇という形で支払われるのである。

最後に、公的助成金による資金援助を受けずに、施設のオーナーや民間事業者が充電器を設置した場合の簡単な予測を紹介する。この場合、経済効果に大きな影響はない。むしろ、公共の充電スタンドが公的資金により設置されると想定したら、政府は予算のバランスを取るために、別の部分で税率の引き上げを行わなければならない。そして結局、コストは事業者や消費者が負担することになるのである。

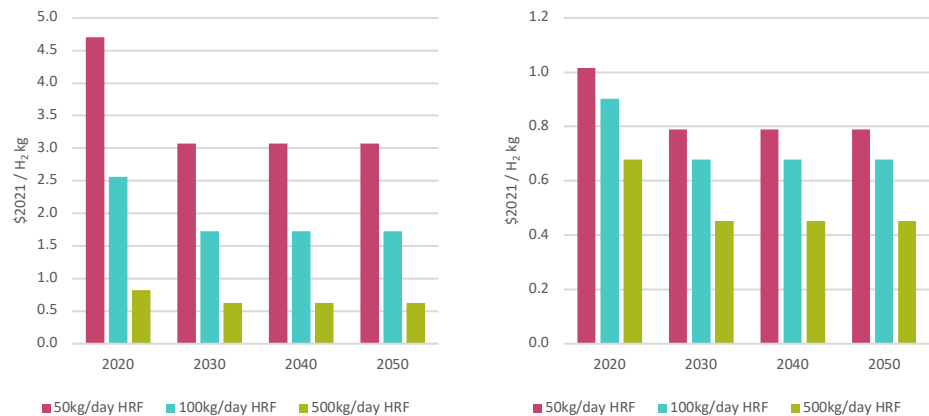
4.2 水素供給インフラ

燃料充填 ステーションの コスト

燃料電池車の燃料補給は、水素充填ステーションで、車載の貯蔵タンクに高圧水素ガスを注入することによって行われる。水素充填ステーション（HRS）は主に、圧縮機、蓄圧器、事前冷却（プレクーラー）・冷蔵設備、ディスペンサで構成される。サイズ、貯蔵タンク（蓄圧器）とバッファータンクの圧力、1時間あたりの充填率といった、HRSの厳密な仕様は、ステーションのサプライヤーと使用目的で変わってくる。

この分析では、700気圧に圧縮できるもので、SAE J2601国際規格で定められた仕様に準拠した3つの規模（1日あたりの供給量が50、100、150kg）のHRSを想定している。下記に示されているステーションにかかる費用の推定額は、イタリアにおける自動車の脱炭素化の経済効果と大気汚染の軽減の予測を記した **Fuelling Italy's Future** を参照している。図4.2は、700気圧の水素を供給できるHRS1台あたりにかかる、推定初期費用と運営固定費である。

図4.2 水素充填ステーションの初期費用（左）と運営固定費（単位：水素1kgあたりのUS\$、2021年の為替相場）



費用は、HRSの寿命を20年、経費は初期費用の7%、利用率は時と共に75%まで増加するという想定の下、供給量1キロあたりでも示されている。これは、製造された水素がトラックで輸送されてくるオフサイト型、もしくは水素を製造できる電解装置を備えたオンサイト型の水素ステーションにとって妥当なコストである。電解槽自体の費用は、製造コストのセクションで説明する。

初期費用と運営固定費は、設計の改善、製造量の増加、サプライチェーンの効率化により、2030年にかけて減少すると考えられる。しかし、この時点で技術は成熟レベルに達し、以降コストは変わらないと考えられる。また、2030年までには、特に大型のステーションでは、初期費用が水素の販売価格に対し比較的少額になる。従って、ここでの予測よりも大きなコスト削減につながる飛躍的進歩が、HRSの設計に適用されたとしても、初期設備投資額

が減少するというメリットはあるものの、水素充填における全体的経済性にはあまり影響しない。

ステーションの運営固定費は図 4.2 に示す通りである。設備の耐久性とサプライチェーンの効率性が向上し、メンテナンスは設備のサプライヤーから派遣されるエンジニアでなく、各ステーションで雇用したスタッフが行うことにより、将来大幅なコスト削減が見込まれる。ここでも、2020 年以降、コストが占める割合は水素燃料全体の原価構造のほんの一部に過ぎない。原価構造においては、水素自体の原価が占める割合が大きい。これは、従来のガソリンスタンドの原価構造に似ている。一方、EV の充電スタンドは、供給する電気の料金に対して、資本コストは高くつく。

水素燃料供給の インフラ整備

日本の水素市場における HRS の今後の設置率は、FCEV の展開、特に 2020 年以降の第二世代モデルの展開と、コスト削減により実現する販売価格の変革に大きく関わっている。この分析では、日本におけるステーションの数（及びそこに含まれる初期費用と運営費）は、各シナリオにおける燃料電池車の普及率と、ひとつの HRS で水素供給可能な燃料電池車数の予測に直接関わってくる。HRS の展開をモデル化するために、最初の設置は 1 日あたりの供給量が 50~100kg の小規模のものを想定しているが、これは 2030 年以降徐々になくなり、1 日あたりの供給量が 500kg といった大型のものが主流になっていくと考えられる。

各タイプ HRS の相対的展開を明らかにするとともに、FCEV に水素を安定供給できる HRS の総数を比重に関する仮定をいくつも行うことにより見積もった。具体的には、1 日の供給能力 50kg の HRS では、2030 年には 1 日に 100 台の FCEV に供給可能、2050 年には 150 台に供給可能になる。1 日の供給能力 100kg の HRS では、2030 年には 1 日に 250 台に供給可能で、2050 年には 300 台に供給可能、1 日の供給能力 500kg の HRS では、2030 年には 1 日に 1250 台に供給可能で、2050 年には供給能力が 2000 台に増加すると予測される。

表 4.2 は、我々の予測に基づいて組み立てた、TECH2030 フェーズアウトシナリオにおける、予測期間中の比重を含めた水素インフラ整備の展開の概要を示している。

表 4.2: TECH 2030 フェーズアウトシナリオにおける HRS 総数内訳

可変要素	タイプ	2020	2030	2040	2050
自動車保有数（単位：千台）	全車両	62,816	62,557	62,757	62,806
自動車保有数（単位：千台）	FCEVs	4	1,143	2,663	3,076
保有数に占める割合	FCEVs	0.0%	1.8%	4.2%	4.9%
供給率（1つの HRS で 賄える車両台数）	50 kg / 日	100	100	150	150
	100 kg / 日	200	250	300	300
	500 kg / 日	1,000	1,250	1,500	2,000
HRS 総数	50 kg / 日	42	142	19	-

	100 kg / 日	-	226	49	-
	500 kg / 日	-	495	1,492	1,500
	合計	42	863	1,560	1,500

充填ステーションの 設置費用

毎年追加される HRS の数は、水素供給能力が 50kg/日、100kg/日、500kg/日の各 HRS の設置計画に応じて増加する。この増加は、ステーションごとに見積もられた、各シナリオにおける FCEV への燃料供給に必要な年間必要投資額を得るための資本コストによるものである（図 4.3 参照）。図 4.3 は、CPI シナリオと TECH30 フェーズアウトシナリオにおける累積必要投資額を示している。

図 4.3 CPI シナリオ（左）と TECH2030 フェーズアウトシナリオにおける、全 FCEV に対応できる累積必要投資額（単位 10 億 US\$、2021 年の為替相場）

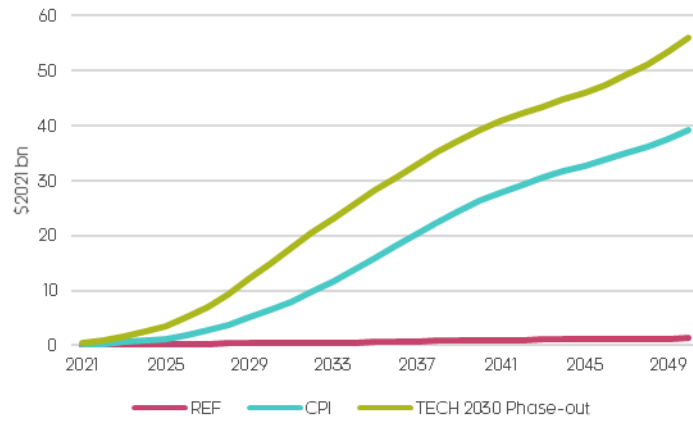


EV 急速充電の公共インフラ同様、最初はステーション側が負担する、水素インフラ整備の費用も、最終的には消費者に転嫁される。ショッピングモールや高速道路のサービスエリアにおけるインフラの費用は、最終的には、卸売と小売市場における価格の上昇という形で消費者が負担することになる。しかし、全体の自動車保有台数に占める FCEV の数は少ないため、各シナリオにおいて設置されるステーションの数がマクロ経済的なモデル化に与える影響は最小限にとどまる。

4.3 インフラにおける累積投資額

図 4.4 は、2021 年から 2050 年までのシナリオごとのインフラにかかる累積投資額の変化を示す。TECH2030 フェーズアウトシナリオでは、BEV の普及にはインフラの迅速な整備が必須である。2050 年には、インフラへの累積投資総額は、TECH2030 フェーズアウトシナリオでは 560 億ドルに、CPI シナリオでは 390 億ドル以上に達する。CPI シナリオと REF シナリオでは、高度パワートレインの導入が少ないので、インフラへの投資額も少なくなる。（REF シナリオでは 13 億ドル程度）

図 4.4 各シナリオにおけるインフラ整備にかかる累積投資額 (単位 10 億 US\$、2021 年の為替相場)



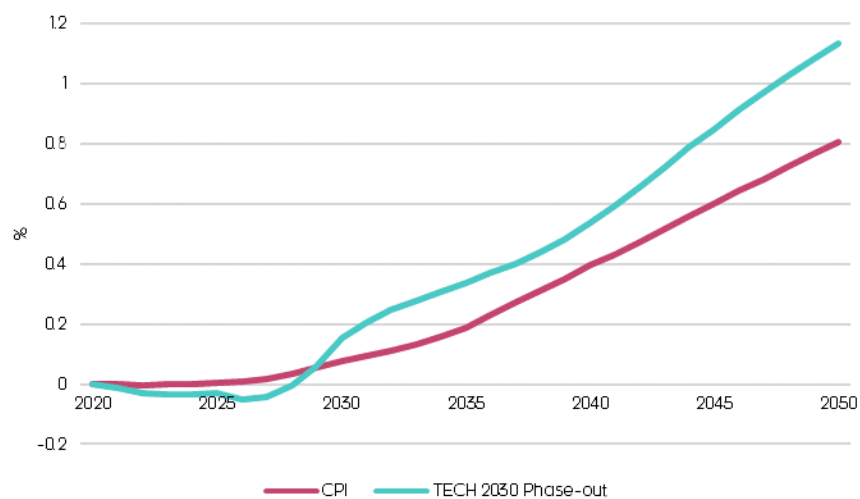
5 社会経済的影響

現在から状況が変わらないという想定での REF シナリオ、及び現在の政策を反映した CPI シナリオと比較した、日本における乗用車の脱炭素化が及ぼす経済への影響の予測には E3ME モデルを採用した。このセクションで提示する経済への影響とは、乗用車の脱炭素化が日本経済に及ぼすものである。これは、予測期間中、発電構成比に大きな変化はないという電力部門の「中心的な」見解をベースにしている。

5.1 実質 GDP への影響

REF シナリオと比較した経済への影響は、CPI シナリオと TECH2030 フェーズアウトシナリオでは違う道を進む。CPI シナリオでは、輸入ガソリンへの支出から、自動車におけるより大きな資本コンテンツと脱炭素燃料への支出へと徐々に移行していくため、2050 年にかけて GDP は着実に増加していく。TECH2030 フェーズアウトシナリオでは、石油の輸入量の減少率は高いが、初期段階では BEV のコスト増加が販売価格の上昇につながり、その結果実質所得が低下し消費活動も不振になる。つまり、自動車や部品の製造におけるバリューチェーンにおける GDP が増加し、経済を構成する他の部門における GDP が停滞する。

図 5.1 REF シナリオと比較した GDP 推移



それでも、2030 年までには、GDP は CPI シナリオより TECH2030 フェーズアウトシナリオの方が高くなる（図 5.1 参照）。TECH2030 フェーズアウトシナリオでは、日本で保有されている自動車はより燃費が良くなる（燃費率がより高い BEV の割合が増加し、特定の燃費技術が他のパワートレインの車にも搭載されるため）。これにより、消費者の燃料にかかる出費が減り、化石燃料における出費も大幅に減少する。化石燃料は輸入に依存しているので、これが国産の電力や他の消耗品の消費に置き換えられれば、日本経済からの流出を減少させられる。そして、貿易収支のバランスが改善され、国内の経済活動が活性化し、経済における更なる複合的なプラス効果につながる。

主要な経済指標の概要は表 5.1 に示すとおりである。

表 5.1: マクロ経済指標

	TECH 2030	
	CPI	フェーズアウト
2030年時点の変化		
GDP (%)	0.1%	0.1%
雇用 (単位:千人)	18	29
石油の輸入量(%)	-4.5%	-12.9%
乗用車による CO ₂ 排出量 (mt メガトン)	-8.3	-23.4
	TECH 2030	
	CPI	フェーズアウト
2050年時点の変化		
GDP (%)	0.8%	1.1%
雇用 (単位:千人)	200	281
石油の輸入量(%)	-22.8%	-35.4%
乗用車による CO ₂ 排出量 (メガトン)	-39.4	-60.9

自動車のコスト、EV バッテリーを含む低炭素技術、自動車サプライチェーンの所在地、今後のガソリン、水素燃料、電気の価格といった多くの要素が関わるので、長期における経済的な影響の予測は難しい。しかし、主な影響は石油の輸入量の減少によってもたらされる。つまりマクロ経済的な状況の変化として、CPI シナリオと TECH2030 フェーズアウトシナリオでは、GDP への影響は石油輸入量に左右されることが明白である。2030 年以降、GDP と雇用への影響に関して、最大の経済的恩恵をもたらすのは意欲的な TECH2030 フェーズアウトシナリオである。そして、それは主に石油輸入量の大幅な減少によるものである。言い換えれば、TECH2030 フェーズアウトシナリオが、最大限の総合的利益と CO₂ 排出量の十分な減少を達成できるということである。

尚、各シナリオでは、世界の他の国や地域における需要の変化が及ぼす影響については、明確には想定していない。例えば、自動車の国内需要が、国内の自動車販売においてエンジン車が依然支配的な REF シナリオと CPI シナリオの軌道を辿り、諸外国では EV へのシフトが行われた場合、日本車の輸出量は減少し、GDP の低下を招く。しかしこういった影響は数値化されていない。

5.2 雇用

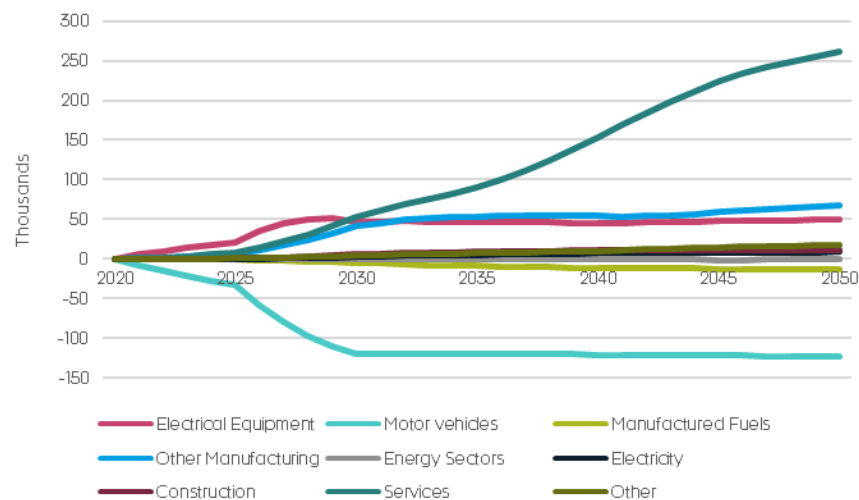
雇用への影響は、生産活動への影響と関係しているものの、幾分違った形で現れる。雇用への影響を見積もるには、影響を受ける各部門の雇用密度と、賃金への潜在的影響を考慮しなければならない。

自動車産業では大規模なオートメーション化が進み、低炭素化における影響を考慮しなくても、雇用数自体が減少すると予測される。これは BEV への移行によりさらに深刻化する。EV の製造に必要な労働力は、取って代わられるガソリン車やディーゼル車に比べ少ない。一方、ハイブリッドとプラグインハイブリッド車は、より大きな労働力の必要性が見込まれる。Cambridge Econometrics が以前発表した *Fuelling Europe's Future*（「活性化するヨーロッパ経済の未来」石油からの脱却がいかに経済を強化するかを提示したも）からのモデル化によれば、脱炭素化による自動車産業における雇用への全体的な影響は、多様化した各技術の市場シェアと、輸入と国産の割合で変わってくる。

図 5.2 は、TECH2030 フェーズアウトシナリオにおいて、自動車の低炭素化によって起こる国内の職種の変化を、REF シナリオと比較して示している。これによれば、車の構造が複雑化することにより製造部門における雇用総数は少しずつ増加する。また、将来的に自動車のコストが下がると、消費者の消費対象は、他のモノやサービスへシフトして行き、その結果、サービス部門における雇用が大幅に増加する。

対照的に、TECH2030 フェーズアウトシナリオにおいては、自動車部門における雇用数は 2030 年にかけて徐々に減少する。自動車部門の雇用において、全体的にマイナスの影響があるのは、ガソリンもしくはディーゼル ICE 車とハイブリッド車が、着々と BEV に置き換わっていくことに起因する。両者のサプライチェーンは別なので、電気装置やその他の製造業での雇用の増加に見られる。また、BEV は組み立てが複雑でないので従来の自動車関連の仕事は少なくなる。

図 5.2 車の脱炭素化による部門別雇用への影響（TECH2030 フェーズアウトシナリオの REF シナリオに対する比較）



電気機器部門、自動車部門、燃料製造部門

その他の製造部門、エネルギー部門、電力部門

建設部門、サービス部門、その他

自動車部門における雇用への影響は重要な課題である。マクロ経済的モデル化のアプローチの利点は、経済全体における脱炭素化の影響を予測可能にし

ていることである。脱炭素化を成功させるには、廃止される技術に関連した仕事に携わる人たちの失業への対応が必要となる。特にオートメーション化が進んでいる産業全体における背景も考慮して、自動車部門における転換を、公平な移行であることを保証することに重点をおいた方針を取るべきである。

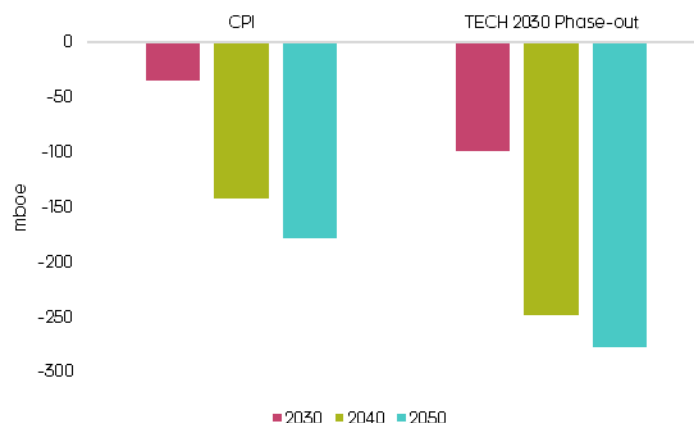
一番大きな雇用を生むのはサービス部門である。これは主に自動車のコストダウンによるものである。BEVの購入価格は低下し、維持費や燃料代も少ないので、BEVを所有することによって発生する費用の総額は、ガソリンもしくはディーゼルICE車に比べて少なくなる。その結果、消費者は自動車にかかる費用が減った分の世帯収入を他のモノやサービスへの消費に回すことができるようになる。消費者は浮いた分のお金を現在支出に当てている範囲内で、他のモノやサービスへの消費を増やすと考えられる。経済において特定のモノの価格が下がっても、消費者の消費と貯蓄の傾向は変わらないという前提である。現在の消費パターンを反映すると、その多くが、ホテルやレストランといったサービスに使われるようになるため、サービス部門に新たな需要と雇用を生む。さらにサプライチェーンでは、経済の他の部門へのビジネスサービスにおいても新たな雇用を生む。こちらは、消費者サービスにおける新たな雇用と比べ、規模的に派生的なものである。

5.3 化石燃料の輸入

日本は化石燃料の天然資源に乏しく、ほぼ全面的に輸入に頼り、国内では原子力を生産してきた。従って、日本のエネルギー構成において、輸入化石燃料は重要な役割を果たしている。

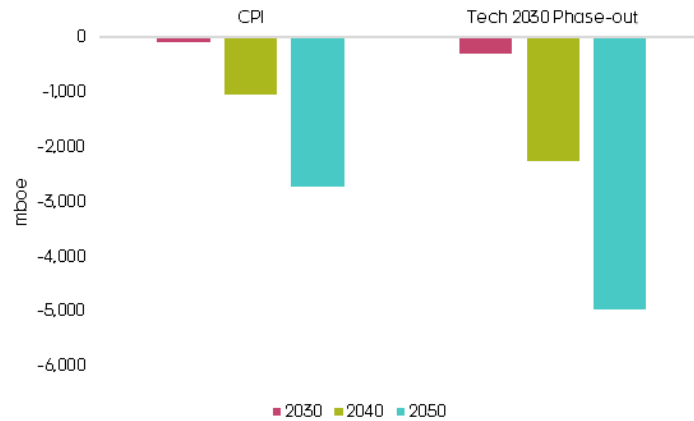
CPIシナリオでは、2040年には化石燃料の年間輸入量は、REFシナリオに比べ約142 mboe（石油換算千バレル）減少する。ガソリンもしくはディーゼルICE車のより迅速なフェーズアウトが実現すれば、輸入量の減少はより顕著になり、TECH2030フェーズアウトシナリオでは、2030年までに249 mboe減少する。また、同シナリオでは、2050年には、化石燃料の年間輸入量は、REFシナリオに比べて277 mboe減少する（図5.3参照）。

図 5.3 化石燃料の年間輸入削減量 (REFシナリオとの差、単位：mboe)



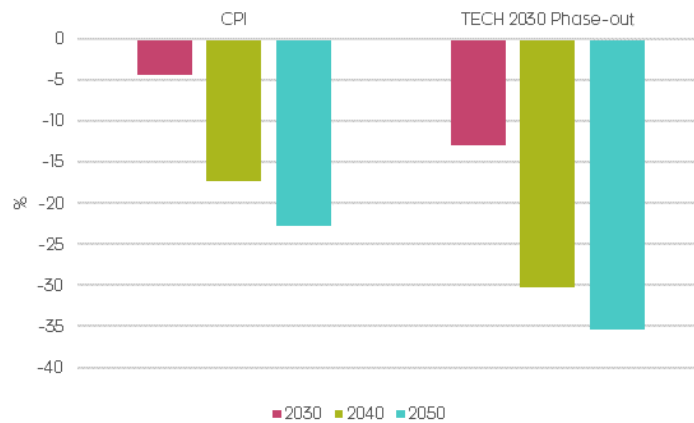
これにより、2050年までに、化石燃料の累積輸入量が、CPIシナリオでは2,749 mboe、TECH2030フェーズアウトシナリオでは4,974 mboe削減される（図5.4参照）。

図 5.4 化石燃料の累積輸入削減量 (REF シナリオとの差、単位 : mboe)



石油だけを見れば、相当な輸入量を減らすことができる。CPI シナリオでは、2050 年には依然ガソリンを使用する HEV と PHEV が主流であると考えられるため、石油の年間輸入減少量は 23% 以下となっている。しかしガソリンと軽油から電力への大幅な移行は、石油の需要を減らすため、TECH2030 フェーズアウトシナリオでは、2050 年までに REF シナリオと比べ、石油の年間輸入量を 35% 以上減少させられる。つまり、高度なパワートレインを搭載した車の普及は、日本経済における石油への依存度を減少させる。

図 5.5 年間石油輸入量減少量 (REF シナリオに対するパーセンテージ)



6 環境への影響

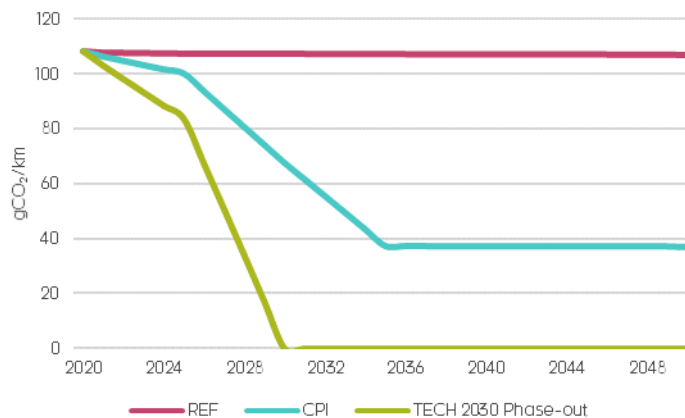
6.1 CO₂ 排出量に対する影響

平均排出量

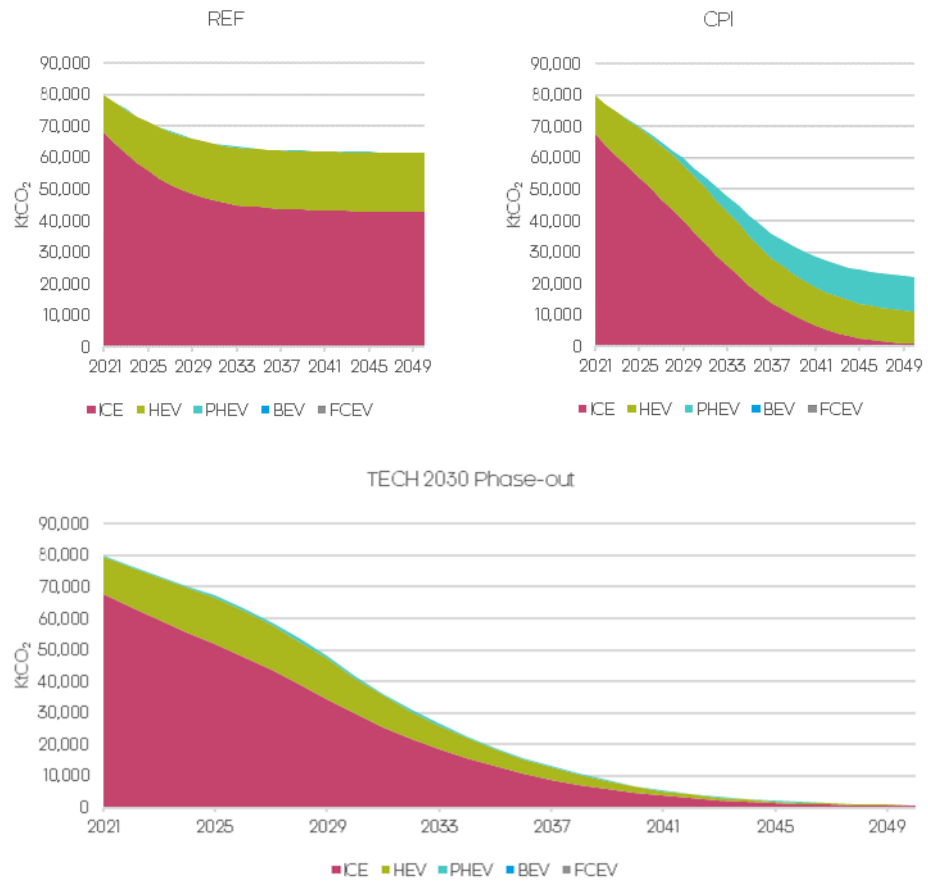
図 6.1.に示すのは、各シナリオにおける新車の平均 CO₂ 排出量の推移である。TECH2030 フェーズアウトシナリオでは、2025 年以降、排ガスは急速に減少する。そして 2030 年にゼロカーボンでない車が廃止された後は、排ガスはゼロとなる。しかし、CPI シナリオにおける CO₂ の平均排出量は、2035 年でも走行 1 km あたり 37g までにしか削減されず、その後も予測対象期間中その数値は変わらない。HEV と PHEV は排ガスゼロ車でないため、CPI シナリオにおいては、新車の脱炭素化は実現していない。そして、現在のところ HEV と PHEV の廃止期限は明示されていない。

年間 CO₂ 総排出量

図 6.1: 新車の平均 CO₂ 排出量推移 (走行 1Km あたりの排出 g)



TECH2030 フェーズアウトシナリオでは、フェーズアウト後の新車の排ガスはゼロとなるが、全保有車における排ガス量の減少率はかなり緩やかである。現在使用されているガソリンもしくはディーゼル ICE 車が全てなくなるまで時間を要するためである。それでも、TECH2030 フェーズアウトシナリオにおいては、保有車のほとんどが排ガスゼロになっている。REF シナリオと比べ、TECH2030 フェーズアウトシナリオにおける保有車の年間 CO₂ 排出量は、2050 年には 99% 減少する (図 6.2)。これは、少数の古いガソリンもしくはディーゼル ICE 車と HEV が廃車にされず残っているからである。また、2035 年にガソリンもしくはディーゼル ICE の新車販売を廃止する CPI シナリオと比べても、2050 年の排ガス量は 97% と著しく低くなっている。

図 6.2 全保有車からの平均排ガス量 (KtCO₂)

6.2 粒子状物質と窒素酸化物の排出量に対する影響

自動車から排出される PM₁₀ と呼ばれる粒子状物質と窒素酸化物 (NO_x) は人体に有害で、多くの都市部で大気の水質に甚大な影響を与えている。乗用車の脱炭素化により、これらの汚染物質を大幅に減少させることができる。

CPI シナリオでは、自動車からの粒子状物質 PM₁₀ の排出が、2020 年の年間 705 トンから 2050 年には 278 トンに減少している (図 6.4 参照)。NO_x は 2020 年には 32,722 トン排出されていたが、2050 年には 8,031 トンに減少すると予測される (図 6.3 参照)。一方、TECH シナリオでは、両者とも 99% 減少させることができ、有害な PM₁₀ と NO_x の排出をほぼゼロにすることができる。これは主にガソリン車とディーゼル車から、ゼロカーボンの電気自動車と水素燃料自動車への移行によって達成される。

ちなみに、ここでモデル化している粒子状物質の排出は、車の排気ガスに由来するものだけである。排気ガスの量は相当なものであるが、自動車から発生する一つの大気汚染物質源である。道路交通において排出される粒子状物質の最大の発生源は、タイヤとブレーキパッドの摩耗及び道路の摩擦で、粒子状物質の総排出量の半分以上を占める。

図 6.4 各シナリオにおける 2020 年時点からの PM₁₀ 排出量の削減率

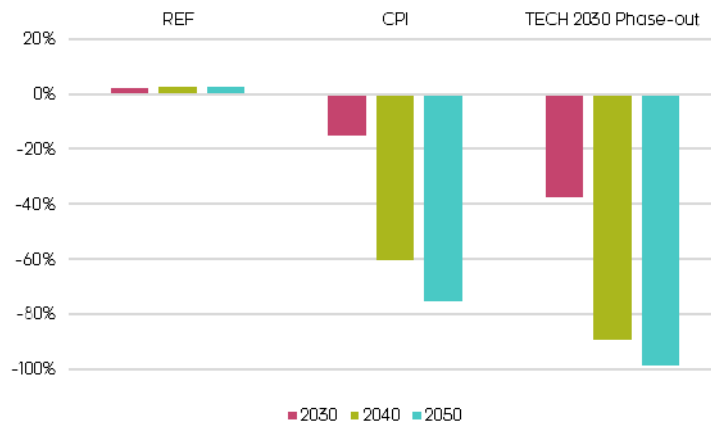
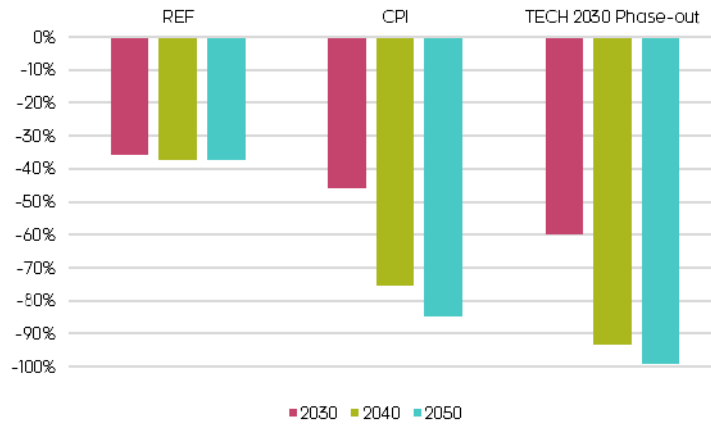


図 6.3 シナリオにおける 2020 年時点からの NO_x 排出量の削減率



7 電力部門の脱炭素化による影響

7.1 電力消費に伴う CO₂ 排出量

電力部門における変化と、電力における化石燃料と低炭素燃料の役割に目を向けると、ガソリンもしくはディーゼル ICE 車の CO₂ 排出量だけでなく、EV が使用する電気による間接的な CO₂ 排出量を見積もることができる。このセクションでは、日本で保有されている PHEV と BEV が燃料とする電気の生産に関連した間接的な CO₂ の排出について見積もる。

セクション 3.6 で述べたように、発電における構成は2つ考えられる。最初の「中心的」ケースでは、脱炭素化に関する意欲的な政策の欠如がもたらす化石燃料に部分的に依存した発電構成である。2050 年になっても、発電において石炭は 15%、天然ガスは 12% 使用されている。一方、「脱炭素化」シナリオでは、再生可能エネルギーから生産される電力量が増加し、脱炭素化グリッドからの電力供給量が増加していく。このシナリオでは、再生可能エネルギー源の迅速な確保により、2050 年には再生可能エネルギー源による電力が 94% を占めるようになる。

電力部門における脱炭素化は、EV に関連した排ガス負荷に大きな影響を与える。EV の普及により、自動車による電力の消費は大幅に増加するからである。BEV の直接的な排出ガスがゼロでも、電気による CO₂ 排出がゼロでなければ、発電による排出も含む、燃料採掘から製造、走行までにおける BEV に関連した全体の CO₂ 排出量は依然大きな数値となる。

図 7.1 と図 7.2 は、乗用車の販売構成で分けた各シナリオに、電力部門における「中心的」ケースと「脱炭素化」ケースを反映したものを示す。REF シナリオでは、EV の全体保有台数が少ないため、間接的 CO₂ の排出量は少ない。一方、CPI シナリオと TECH2030 フェーズアウトシナリオでは、消極的な「中心的」ケースにおいて、CO₂ の年間排出量は 2040 年にピークを迎えた後減少し、2050 年にはそれぞれ 7.7 メガトン、14.9 メガトンとなる。しかし、電力部門の「脱炭素化」ケースでは、TECH2030 フェーズアウトシナリオにおける後年でも CO₂ の排出量はわずかとなる。電力部門が再生可能エネルギーを使用することにより、EV が乗用車の主流になった時の年間間接排出量は、2030 年という早い段階でピークを迎え、2050 年には「中心的」ケースに比べ、約 9 メガトン減少させることが可能である。

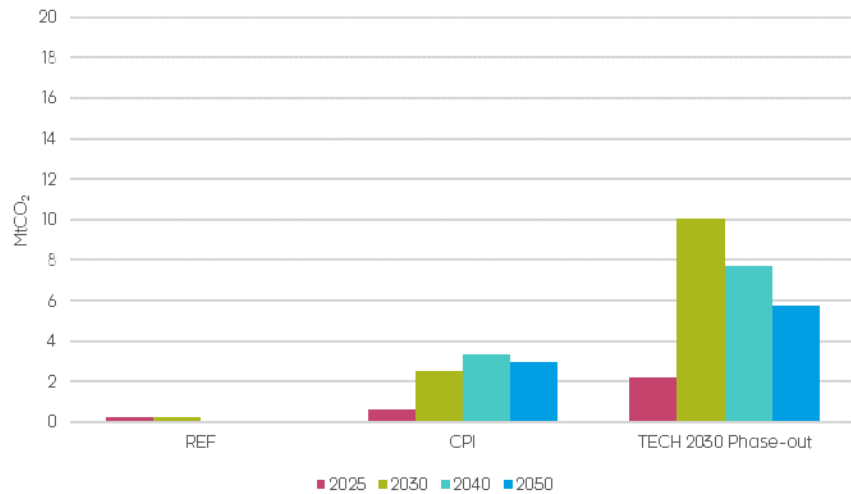
図 7.2 各シナリオにおける年間間接 CO₂ 排出量 (電力部門の「脱炭素化」ケース)

図 7.3 は、REF シナリオ、CPI シナリオ、TECH2030 フェーズアウトシナリオの各シナリオにおいて、電力部門で「中心的」ケースを適用した場合の、原料や燃料調達から走行までの全工程における保有車全体の CO₂ 累積排出量を Mt (メガトン) で示している。2050 年にかけての、自動車燃料として使われる電力の生産に関連した CO₂ 排出量を見てみると、TECH2030 フェーズアウトシナリオは、他の 2 シナリオを大きく下回る。間接排出量の増加が少ないので、直接排出量 (排ガスによる) の減少幅の方が大きくなるからである。

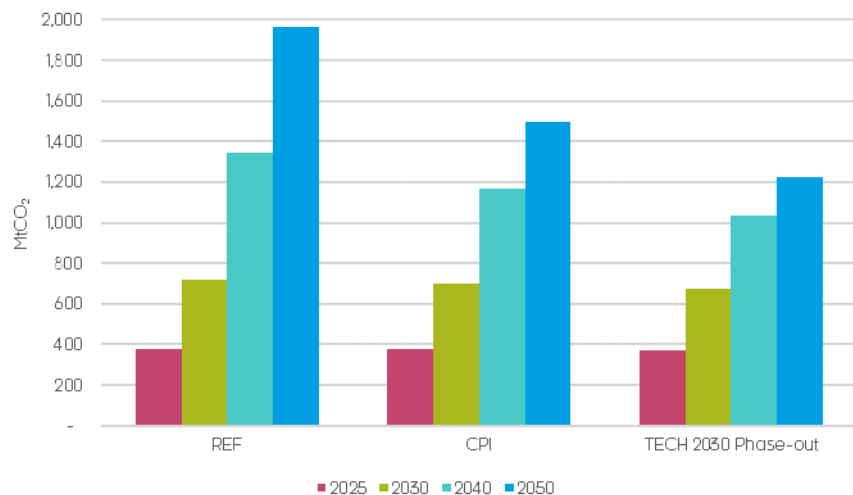
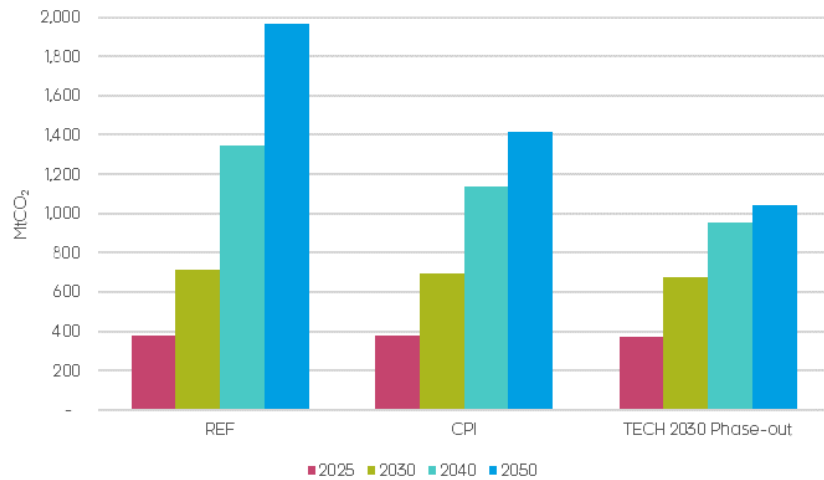
図 7.3 自動車に関連した全工程におけるシナリオ別 CO₂ 累積排出量 (電力部門の「中心的」ケース)

図 7.4 が示すように、大幅な脱炭素化を図った電力システムを導入すれば、燃料確保から製造、走行までの自動車に関連した全工程における全体的な CO₂ 排出の削減量は、REF シナリオより大きくなる。TECH2030 フェーズアウトシナリオに適用している一番迅速な BEV の展開において、電力部門を脱炭素化することにより、「中心的」な電力構成に比べ、乗用車に関連した CO₂ の排出量をさらに 183Mt 以上減少させることができる。

図 7.4 自動車に関連した全工程におけるシナリオ別 CO₂ 累積排出量（電力部門の「脱炭素化」ケース）



7.2 電力部門の脱炭素化における経済的影響

このセクションでは、ベースラインと TECH2030 フェーズアウトシナリオの両方で電力部門の脱炭素化を図った場合の、日本における乗用車の脱炭素化が経済に与える影響を予測する。これにより、自動車市場の電動化における脱炭素化の全体的な影響を予測できる。

電力部門の「脱炭素化」シナリオにおける、経済への全体的な影響は「中心的」シナリオと似通ったものになる（今一度以下に繰り返すが、第 5 章も述べた通りである）。2030 年までにガソリンもしくはディーゼル ICE 車の販売をフェーズアウトすることは、GDP と雇用の両方に好影響を与える。2030 年には、低炭素発電技術への投資額が増加したことを受け、脱炭素化を図った電力部門においては GDP と雇用の増加は「中心的」シナリオより若干大きくなる。しかし、2050 年までには、「中心的」シナリオに比べ、経済効果はかなり緩やかになる。これは、脱炭素化した電力は若干価格が高くなり、EV の燃料補給にかかる支出が増え、消費者サービスに再配分できる資金が少なくなるためである。また、雇用に関しては、電力部門で新しく生まれるものの、サービス部門に比べて労働集約型ではないので、全体的な雇用数の増加はより少なくなる（表 7.1 参照）。

現在の分析には含まれていないが、電力部門の脱炭素化は、日本経済にさらなる好影響を与える可能性がある。これは、低炭素及び再生可能エネルギーの発電技術への投資の恩恵である。投資活動の活性化と、化石燃料の輸入量削減が、国内需要と生産活動と雇用を増加させ、プラス経済効果につながるのである。

表 7.1: 電力部門の脱炭素化におけるマクロ経済的指標

	TECH 2030 中心的な発電構成	TECH 2030 脱炭素化した発電構成
2030年時点の影響		
GDP (%)	0.1%	0.2%
雇用 (単位: 千人)	29	42
2050年時点の影響		
GDP (%)	1.1%	0.7%
雇用 (単位: 千人)	281	219

8 結論

この調査は日本における乗用車の脱炭素化の潜在的な影響を予測してものである。

分析結果によれば、ゼロカーボンでない車のフェーズアウト（段階的廃止）が、経済的にも環境的にも望ましいことを示している。達成されるのが早いほど、その潜在的メリットは大きくなる。TECH2030 フェーズアウトシナリオが示す技術移行は、大きなプラスの経済効果を生む。それは、石油輸入量の減少、各家庭における維持費も含めた車にかかる費用総額の軽減、他のモノやサービスの消費の増加によるものである。さらに、日本の輸入石油への依存度の低下と、電力の国内生産は、エネルギーの安定供給にもつながる。

TECH2030 フェーズアウトシナリオは GDP の成長に大きく影響するだけでなく、ガソリン車とディーゼル車の早期フェーズアウトは、CO₂排出量の大幅な低下につながることを示している。また、EV の普及は各地の大気質を改善し、人間の健康状態の大幅な改善にもつながる。

また、我々は日本の発電の未来におけるふたつの想定の下、社会経済的な影響と環境への影響も比較した。脱炭素化した発電は、環境的なメリットは大きいですが、電気代のわずかな上昇により、長いスパンにおけるマクロ経済的効果は緩やかであることを示している。

この分析は、エンジン車販売の迅速なフェーズアウトと、電気自動車に代表される高燃費の自動車への移行は、経済的にも環境的にも大きなメリットがあることを示している。そして、長い目で見ると、経済的効果は少ないもののプラスである。また、経済全体への影響は少なくとも、部門別には大きな変化が予測される。化石燃料に関連した仕事に携わっていた人たちが、低炭素社会で新たに仕事に就けるよう研修を設けるといった、各分野の雇用における変化への対応が求められる。

9 Appendices

Appendix A 補足資料：E3ME モデルの解説

E3ME は、世界経済、エネルギーシステム、環境に関するコンピュータ分析モデルである。元々は欧州委員会の研究フレームワークプログラムにより開発されたものだが、現在は、ヨーロッパで政策評価、予測、研究に広く使用されている。

A.1 モデルに導かれる政策策定

E3ME は、気候緩和政策の経済と労働市場への影響について評価するために使用されることが多い。基本的なモデル構造は、経済とエネルギーシステムを関連付け、各分野間で矛盾がないようにするものである。

評価の対象となる政策や方針には以下のようなものを含む。

- 炭素税、エネルギー税
- 排出権取引制度
- 環境税改革
- 燃費向上プログラム
- 電力、輸送、住宅部門における特定の技術への助成金
- 特定の燃料のフェーズアウト、及びその他の直接的な規制
- 資源効率プログラム

モデルの分析結果 や妥当性に左右さ れる政策

最近 E3ME が適用された例では、EU の 2030 年に向けた気候変動とエネルギー政策の影響の評価、カーボンニュートラル達成に向けた EU 長期戦略がある。EU のクリーンエネルギー政策のデータに使われている、エネルギー効率指令 (EED) と建築物エネルギー消費指令 (EPBD) が発表する見解にも使用されている。また、国際再生可能エネルギー機関 (IRENA) や、New Climate Economy による 2018 年レポートにおいてなど、EU 以外でも分析に使用されることが多くなっている。

A.2 モデルが提供する結果の範囲幅の評価

E3 (エネルギー、環境、経済) のグローバルモデルとして、E3ME は政策における分析を以下のように包括的に行う。

- エネルギー需要と CO₂ 排出量の減少について、燃料の切り替え、再生可能エネルギーといったものの直接的影響について
- 燃料のサプライヤー、燃料の価格、競争力における影響といった二次的影響について
- より低価格のエネルギーやモノの消費が、追加的なエネルギーまたはより高度な経済活動の消費で相殺されるリバウンド効果について
- マクロレベル、部門レベルでの所得配分などの雇用と経済における全体のマクロ経済的影響について

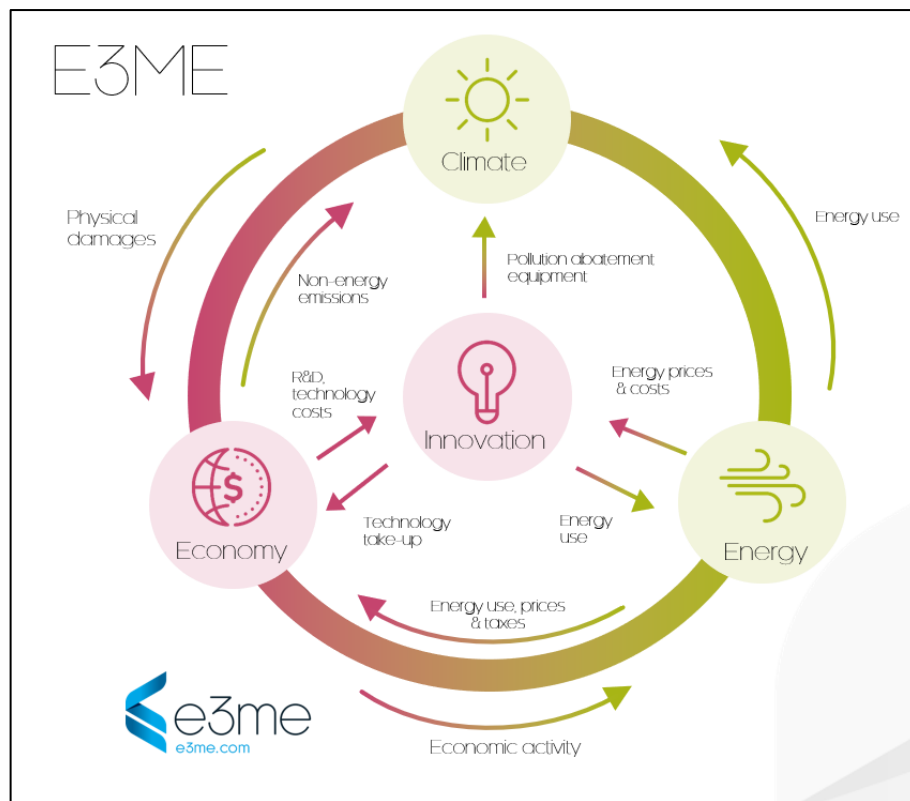
A.3 理論的裏付け

社会において、個人、家庭、企業やその他のグループによって営まれている経済活動は、他のグループに影響を与える。その影響は、時には時間をおいて現れ、また次世代まで存続する。しかし、多くの影響や要素があり、メリ

ットとデメリットのどちらもが経済的物質的ストックに蓄積されるのである。

こうした影響は、環境、経済、市価、貨幣システム（労働、商品の市場を通して）、さらにグローバル輸送や情報ネットワークにも波及する。市場は、大きく以下の3通りによって影響を波及させる。すなわち、原料、燃料、労働のインプットへの需要を生み出す活動レベル、所得に影響を与える賃金と市場価格、モノやサービスへの更なる需要につながる所得である。これらの相互依存性から、E3モデルが包括的で、経済やエネルギーシステムを構成する色々な部分間でのつながりを多く含むべきものであることがわかる。

下図は、理想的なモデルの図である。現在のモデルは、物理的な損害についての処理が限定的である（モデルの適用外とされることが多い）。また、モデルの使用者から外因的に特定される公害軽減装置についても同様である。これらの課題は、将来修正される余地がある。



<図内>

E3ME モデル

Climate: 気候

Economy: 経済

Energy: エネルギー

Physical damages: 物的損害

Economic activity: 経済活動

Energy use: エネルギー利用

Non-energy emission: CO₂ 排出ゼロ

R&D, technology costs: R&D、技術にかかるコスト

Technology take-up: 技術投入

Energy use, prices & taxes: エネルギー利用、価格、税金

Energy use: エネルギー利用

Energy prices & costs: エネルギー価格とコスト

Pollution-abatement equipment: 公害軽減装置

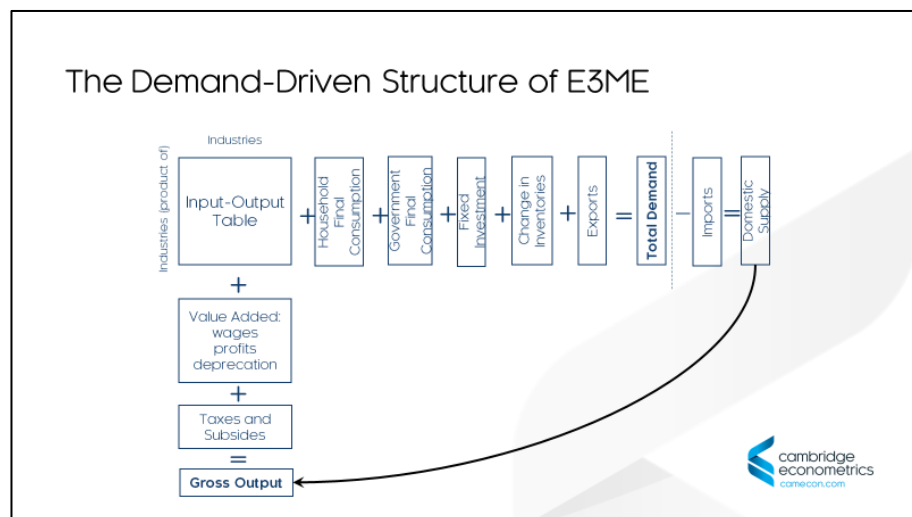
Innovation: イノベーション

E3ME モデルは計算可能一般均衡（CGE）モデルと比べられることが多い。多くの点で、モデル化のアプローチが似ている。両者は、似たような問いに答え、似たようなインプットとアウトプットを使っている。しかし、実際はモデル化のアプローチにおいて理論的に大きな違いがある。

CGE の典型的なフレームワークでは、最適化行動が前提となり、アウトプットは利潤を最大化するように供給側を重視し、市場均衡レベルに完全に適応した価格によって決定される。一方、E3ME モデルでは、アウトプットは、ポスト・ケインズ型の、需要重視の計算フレームワークによるものである。これは経済に余力を残す可能性がある（下図参照）。価格は市場均衡レベルに常に適応しているという前提ではない。

この違いには実用的意義がある。というのも、E2ME では経済力の余剰部分に当てることができるならば、規制や政策はアウトプットの増加につながる可能性があるという意味を持つからである。詳細はモデルマニュアルに記載している。

E3ME モデルは、計量経済学上の特性により、実証に基づいた強い基盤を持つ。E3ME は誤差修正システムを採用し、短期における変化の推移を示し、それが長期における予測につながる。通常モデルの分析結果に含まれる、短期と中期（例えば 2020 年までといった）における分析とリバウンド効果を見るとき、動的な明細は重要になる。



<図内>

E3ME モデルの需要主導型構造

Industries: 産業

Industries (product of): 産業（生産物）

Input-Output Table: インプット・アウトプットの体系

Household Final Consumption: 家計最終消費

Government Final Consumption: 政府最終消費

Fixed Investment: 固定投資

Change in Inventories: 在庫の変化

Exports: 輸出

Total Demand: 総需要

Imports: 輸入

Domestic Supply: 国内供給

Value Added: wages profits depreciation: 付加価値: 賃金、利益

Taxes and Subsidies: 税金と助成金

Gross Output: 総生産高

A.4 モデルの強み

- 経済とエネルギーシステムを相互にリンクさせた、経済、エネルギーシステム、環境の密接な融合が実現している。
- 部門別に細分類しているため、同様に細分化したシナリオの分析が可能になる。
- 全世界をカバーし、経済大国においては国別の分析も可能になっている（全 70 地域）。
- 計量経済学的アプローチは実証に基づいているので、モデルが強力なものになる。つまり、CGE モデルと共通する前提条件のいくつかには依存しない。
- モデルの計量経済学的な特性は、長期予測だけでなく、短期と中期における評価にも適している。

A.5 主な制約

全てのモデル化アプローチにおいて、E3ME は現実を簡略化し、一連の想定に基づいている。他のマクロ経済的アプローチのモデル化に比べ、前提となるものに制限はなく、ほとんどの関連性はデータベースにおける過去のデータによって決定している。しかしこれにより、それ自体の制限事項が出てくる。モデルの使用者は下記のことにご注意されたい。

- モデルに使われるデータの質は極めて重要になる。E3ME データベースの質を保持し、データの誤差を埋めるためには、多数のソースを使用している。しかし、特に発展途上国においては、使用されるデータにより、分析結果に不確実性をもたらす。
- 時として、計量経済学的アプローチでは、未来の動きを予測するのに過去のデータを使うことに対し批判を受ける。大規模な政策変更においては、人々の行動は変わる可能性があることを示唆する「ルーカス批判」も妥当である。未来の完全な予測は不可能なので、どのようなモデル化アプローチを使ってもこの議論における結論は出ないが、モデルの分析結果には、常に不確実性があることを認識しなければならない。

その他の E3ME アプローチにおける主な制限事項は、モデルがカバーする範囲に関することである。一般的に、モデル分類により提供されたものを超えた細部レベルまで分析することは難しい。つまり、部門内や国内で細分化し

て分析するのは難しいということである。同様に、通常あまり重要ではないが、月別、四半期別の影響を評価することも不可能である。

A.6 基本的な構造とデータ

E3ME の構造は、エネルギー需要と大気汚染物質の排出をさらに関連付けた上で、国民所得計算方式をベースにしている。労働市場は、自主退職と解雇の両方を含む失業数など、細部にわたりカバーしている。計量経済学的に作成された方程式は、全部で 33 組ある。構成要素には、GDP（消費、投資、国際貿易）、市場価格、エネルギー需要、原料需要を含む。それぞれの方程式のグループは、国別、部門別に細分化されている。

E3ME の過去のデータベースは、1970 年から 2018 年の期間をカバーし、モデルの予測期間は 1 年ごとに 2050 年までとしている。欧州における主なデータソースには、EC 統計局（Eurostat）及び国際エネルギー機関（IEA）、補足的なものとして経済開発協力機構（OECD）の STAN データベース、その他の適切なソースを使用している。欧州以外の地域においては、国連（UN）、OECD、世界銀行、国際通貨基金（IMF）、国際労働機関（ILO）、各国の統計会社などから提供を受けている。データにおける誤差は、カスタマイズしたソフトウェアのアルゴリズムを使用して概算される。

E3ME の主な対象

- 70 カ国：G20 全加盟国と世界の主要経済国、EU28 と加盟準備国、その他の経済グループ
- 国際分類基準に基づく 44 産業部門（欧州では 70）
- 家計の支出における 28（欧州では 43）カテゴリー
- 燃料 12 種、利用主体 22 分野
- 京都議定書で削減対象となっている温室効果ガス 6 種を含む大気汚染物質 14 種（データが存在する場合）

A.7 主なアウトプット

国民所得の構造全体をベースにした経済の一般的なモデルとして、E3ME は、広範に及ぶ経済指標を提示することが可能である。また、エネルギーと環境における指標にも幅がある。以下は、最も一般的なアウトプットをまとめたものである。

- GDP と GDP の構成要素全体（家計支出と投資、政府支出、国際貿易）
- 部門別アウトプットと粗付加価値、市場価格、貿易、競争力効果
- 部門別、原産国と目的地別の国際貿易
- 消費者価格と支出
- 部門別の雇用及び失業数、賃金率と労働供給量
- 所得分配
- 部門別、燃料別のエネルギー需要及びエネルギー価格
- 部門別、原料タイプ別の原材料需要
- 電力構成比
- 乗用車と暖房技術
- 部門別、燃料別の CO₂ 排出量

- その他の大気汚染物質の排出量

このリストはすべてを網羅しているわけではなく、提示されるアウトプットは、特定の目的における必要条件で変わってくる。上記リストにある部門別の対象に加えて、すべての指標は、国と地域別に 2050 年までの期間 1 年ごとに提示可能である。

E3ME とボトムアップ型技術サブモジュール (FTT) との関連付け

2012 年以降、E3ME における電力部門では、動的選択とイノベーションの拡散において新しいフレームワークを採用している。これには J. F. Mercure によって開発された (2012 年、Mercure)、FTT:Power (電力部門における未来の技術変化) モデルを採用している。これは、技術の普及モデルにおける最初の FTT 群である。現在の E3ME モデルは、輸送部門、鉄鋼部門、熱部門の FTT (FTT:Transport、FTT: Steel、FTT:Heat) とリンクしている。

斬新なアプローチを採用した FTT モデルは、何かを購入する際、複数の選択肢の中からの決定を求められる投資家や世帯の、意思決定の中核として使われる。モデルは技術拡散の理論に基づき、普及率は関連市場におけるシェアと技術の価格に左右される。技術の詳細な表示により、広範囲の政策オプションが可能となってくる。

政策の影響の多くは、構築された技術の寿命による長いタイムラグによって特徴付けられる。しかし、技術が市場に普及し、学習率の適用によりコスト削減が助長されるにつれ、モデルは迅速な移行を見せるようになる。

競合する技術の結果として生じる普及については、再生可能と再生可能でないエネルギー源のグローバルデータベースに限定される。(Mercure & Salas, 2012, 2013)

A.8 現在進行しているモデル開発

現在計画されている E3ME の開発事項を以下に記す。

- 現在の FTT モデルをベースにした、農業部門における新しい土地配分モジュール
- 化学部門におけるボトムアップ型モジュール (FTT:Chemicals)
- 旅客と貨物両方の道路輸送をカバーする FTT:Transport サブモデルの拡張
- 新型コロナウイルス流行期間におけるデータの発表を反映したデータ更新

A.9 モデルマニュアル

E3ME の技術モデルマニュアルは、www.e3me.com でご確認されたい。