

自動車部門における CO₂ 排出削減効果

計量分析ユニット 末広茂、小宮山涼一、松尾雄司、永富悠、森田裕二
地球環境ユニット 沈中元

要約

化石燃料の価格高騰や資源問題、地球温暖化問題など、エネルギー・環境に関するさまざまな課題が表面化している。こうした課題は中長期的に取り組むべきものであり、国際政治の舞台でも、温室効果ガスの排出削減に関しては長期的な目標に向けた協議が活発化している。しかしながら、取り組むべき方向性については多くの研究機関や各国からさまざまな提案があるものの、国別やセクター別の役割などについてはいまだ十分な検討が行なわれていないのが実情である。なかでも、新興国におけるモータリゼーションの進展を背景に、石油需要及び CO₂ 排出量が増加することが見込まれている自動車輸送部門について、このような検討を行うことが益々重要になってきている。本稿では、こうした流れの中で、自動車輸送部門に焦点を当て、CO₂ 排出量の削減ポテンシャルとその費用対効果について分析を行なった結果を報告する。

お問合せ : report@tky.ieej.or.jp

自動車部門における CO₂ 排出削減効果

計量分析ユニット 末広茂、小宮山涼一、松尾雄司、永富悠、森田裕二

地球環境ユニット 沈中元

1. はじめに

化石燃料の価格高騰や資源問題、地球温暖化問題など、エネルギー・環境に関するさまざまな課題が表面化している。こうした課題は中長期的に取り組むべきものであり、多くの研究機関が長期的なビジョンを描き、課題解決に向けた提案を行っている。国際政治の舞台でも、温室効果ガス排出削減についての長期目標に向けた協議が活発化している。2007 年に日本が提案した「Cool Earth 50」（2050 年までに地球全体の排出量の半減を目指す）は、途上国の合意はまだ得られていないが、ベンチマークの一つとなっている。2009 年のラクイラ・サミットでは、Cool Earth 50 に沿ったかたちで、先進国全体で 80% の削減を目指すことで合意した。

しかしながら、こうした提案や合意は、国別やセクター別の役割などに関してもまだ十分な検討が行われていないのが実情である。なかでも、新興国のモータリゼーションの進展を背景に、石油需要及び CO₂ 排出量が増加することが見込まれている自動車輸送部門についての議論は特に重要になってきている。本稿では、こうした流れの中で、自動車輸送部門に焦点を当て、CO₂ 排出量の削減ポテンシャルとその費用対効果について分析を行う。

2. 「IEEJ2050 モデル」の概要

2.1 モデルの概要

「IEEJ2050 モデル」は、中長期における世界のエネルギー需要、エネルギー起源 CO₂ 排出量を予測することを目的に構築されている。各種の経済社会情勢の変化、または政策の変更や技術進展の度合いによる影響をフォワードキャストによって分析することが可能である。対象予測期間は 2010 年から 5 年刻みで 2050 年まで、対象地域は 16 カ国・地域である。エネルギーデータは IEA (Energy Balances of OECD Countries / Non-OECD Countries) をベースとしている。

2.2 モデルの構造

モデル構造は、最終エネルギー消費部門、エネルギー転換部門、一次エネルギー消費部門 (CO₂ 排出量含む) から構成されている。まず、部門 (産業、民生、交通) ごとに最終エネルギー消費を算出した後、各エネルギー需要 (電力、熱、水素など) に見合う供給構成をエネルギー転換部門 (発電、熱供給、水素製造など) にて算出する。そして、最終消費部門と転換部門の合計値として、一次エネルギー消費が算出され、さらに化石燃料起源の CO₂ 排出量が算出される。こうした構造を持ったモデルが 16 地域に展開されている。

表 2-1 モデル対象地域

地域	モデル区分
北米	①米国、②カナダ
中南米	③ブラジル、④他中南米
ヨーロッパ	⑤OECD 欧州、⑥ロシア、⑦他欧州
アジア太平洋	⑧日本、⑨中国、⑩インド、⑪韓国、⑫ASEAN、⑬オセアニア、⑭他アジア
中東	⑮中東
アフリカ	⑯アフリカ

※下線は OECD 諸国（米国、カナダ、OECD 欧州、日本、韓国、オセアニア）。ただし、メキシコは他中南米に含む。

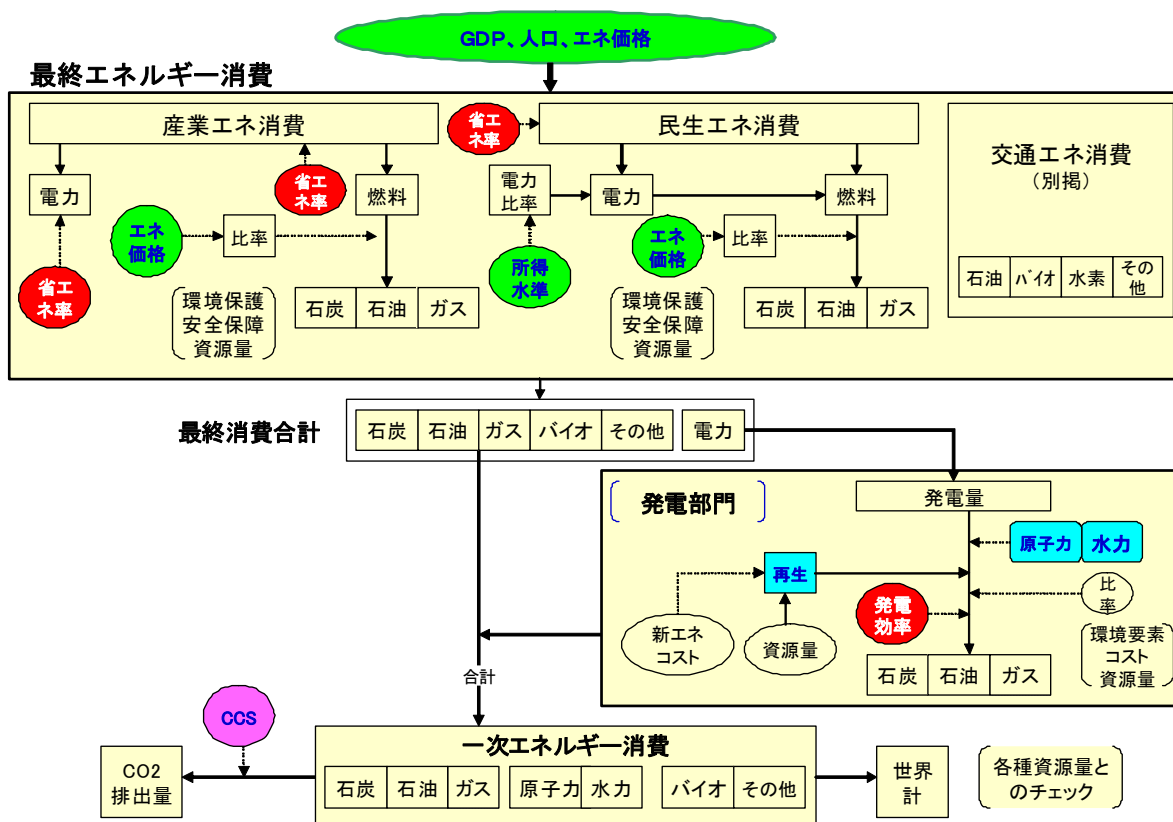


図 2-1 全体モデルのフローチャート

2.2.1 部門別エネルギー需要の算出

各部門のエネルギー需要は、基本的に活動水準（GDP、発電量、輸送量など）とコスト（各種エネルギー価格、初期コスト、維持コストなど）の 2 要素から成る需要関数によって計算される。前者はエネルギー需要の水準を決定するのに対して、後者は省エネ率を通して需要水準に影響を与える以外にも、エネルギー種別間の代替関係を決定する。需要関

数の定式化には、CES (Constant Elasticity of Substitution) 生産関数、ロジスティック曲線関数、効用嗜好関数などを使用した。

例えば、CES 生産関数は一般均衡モデルに多く用いられている需要関数の 1 つである。この関数の背景には、企業 (産業部門) が生産水準と要素価格を所与とした時に、費用最小化行動に基づいてエネルギーを含む各生産要素の投入量を決定する、いわゆる最適化行動を行うことが仮定されている。同様に、家計もある予算制約の下で消費財価格を所与とした時に、効用最大化行動に基づいて消費量を決定することを仮定している。

2.2.2 交通サブモデルの構造

交通サブモデルは、道路部門についてより詳細な分析を行うことを目的として構築している。交通需要は、用途別 (旅客、貨物)、機関別 (自動車、鉄道、船舶、航空) に分割し、さらに自動車については、燃料種別、動力技術別に分割されている。このように詳細に機関別、車種別を考慮することで、例えば、アジア途上国などでのバイクから乗用車への需要移行の影響や、乗用車における動力技術の進展・普及にともなうエネルギー需要への影響などを動的に分析することが可能となる。

表 2-2 モデルで想定している自動車の燃料種・動力技術

燃料種別	動力技術別		
	内燃機関 (ICEV)	内燃機関+モーター 【ハイブリッド車 (HEV)】	モーター 【ゼロエミッション (ZEV)】
ガソリン	① ガソリン車 [GICEV]	⑤ガソリンハイブリッド車 [GICEHEV] ⑥プラグインハイブリッド車 [GICEPHEV] (※電気併用)	
軽油	②ディーゼル車 [DICEV]	⑦ディーゼルハイブリッド車 [DICEHEV]	
LP ガス	③LP ガス自動車 [LPGV]		
天然ガス	④天然ガス自動車 [CNGV]		
電気			⑧電気自動車[EV]
水素			⑨燃料電池自動車[HFCV] ⑩プラグイン燃料電池車 [HFCPHEV] (※電気併用)

乗用車の動力技術や燃費改善については、フロー・ストックの遅れを考慮した積上げ型のモデル構造となっており、新車販売時点でのより現実性の高い想定を置くことで、より

精度の高いエネルギー削減効果、CO₂ 削減効果を測定できる。また、電気自動車や燃料電池自動車の普及に伴う電力需要、水素需要については、全体モデルにて供給構成が考慮されており、いわゆる Well to Wheel における CO₂ 排出量を測定することも可能である。また、ガソリンや軽油に対するバイオ燃料の混合率を想定することで、ブラジルなど地域特性を反映した分析も可能となる。

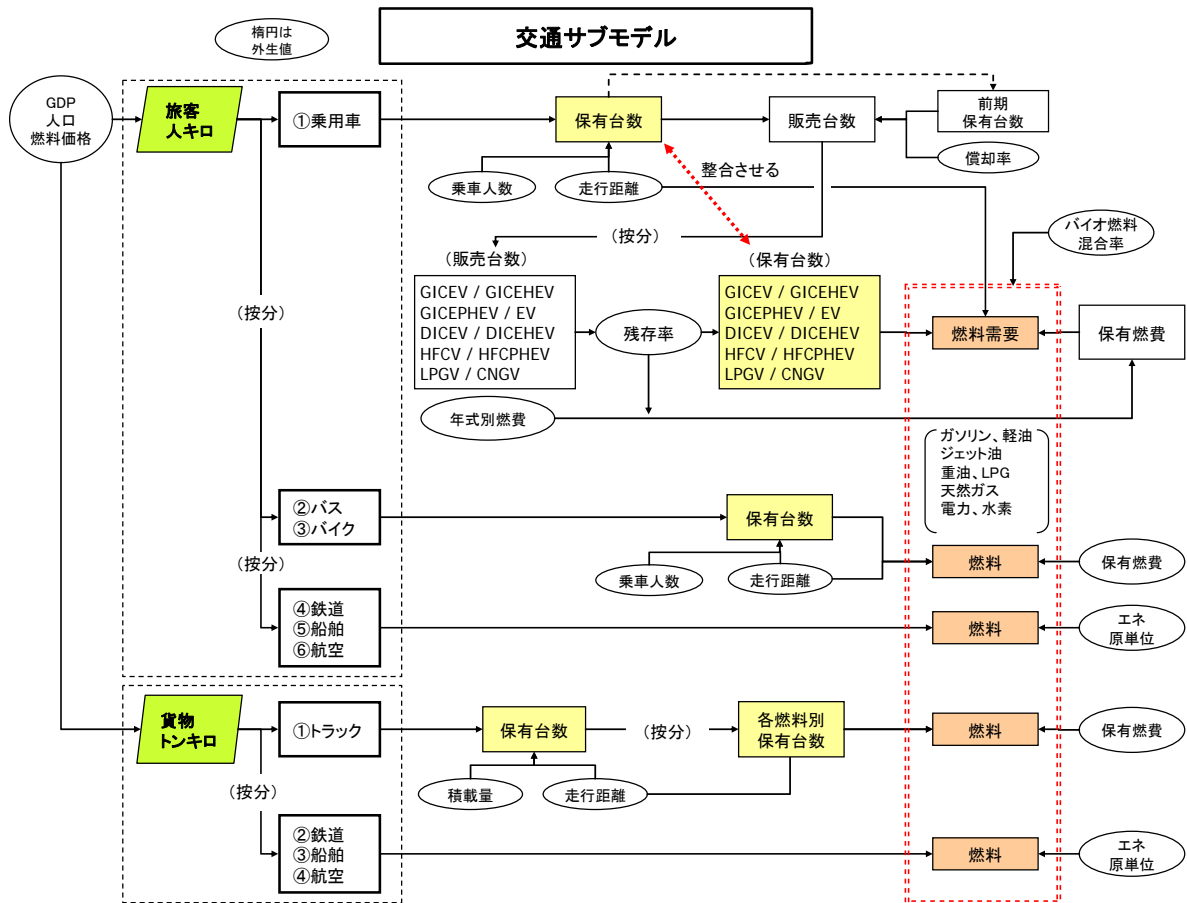


図 2-2 交通サブモデルのフローチャート

3. 2050 年までの世界エネルギー需給見通し（レファレンスケース）

3.1 レファレンスケースの考え方

現時点における各国・地域の経済社会情勢及び国際情勢を鑑み、現行の技術体系と各種政策を前提に、趨勢的な変化をベースにして蓋然性が高いと考えられる各種の想定のもとで推計するケースである。本報告においては、このケースの推計結果について分析を行った上で、後述する技術進展ケースなどの他の試算を評価する際に、比較すべき標準的な結果として使用する。

3.2 主な前提条件

人口見通しは、国際連合“Population Estimates and Projections: The 2008 Revision”を参考にしている。ただし、日本は、国立社会保障・人口問題研究所「日本の将来推計人口」（2006 年 12 月、出生中位・死亡中位推計）を、台湾は、行政院経済建設委員会「中華民國台湾 97 年至 145 年人口推計」（2008 年 9 月、中位予測）を参照した。

2050 年時点の人口は、現在の約 1.4 倍の 90 億人に達する。増加分のほとんどが途上国によるものである。日本や韓国、ロシアなど欧州の多くの国で人口が減少していく一方、インド、中東、アフリカなどが大きく伸びる。高齢化の進む中国は 2030 年ごろをピークに減少に転じる見通しである。

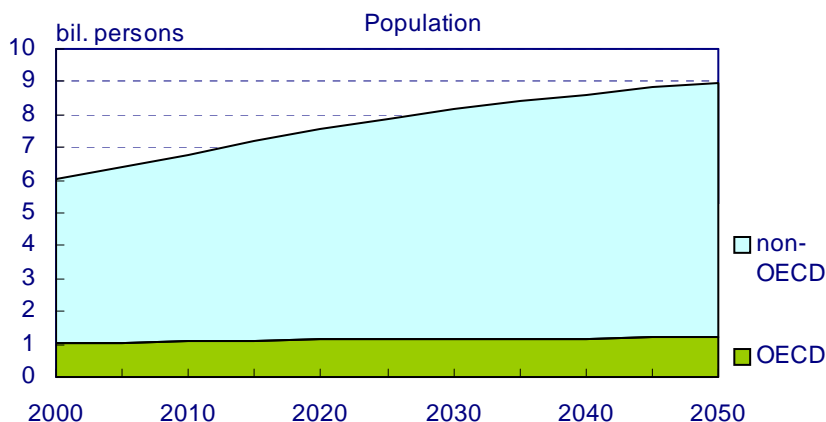


図 3-1 人口の見通し

経済成長率については、長期的な供給要因、すなわち、資本、労働、及び技術進歩（全要素生産性；TFP）に依存すると仮定し、それぞれ要素ごとに想定した上で国内総生産（GDP）を試算した。成長潜在力の大きい BRICs（中国、インド、ブラジル、ロシア）については、生産関数に基づいて試算を行い、その他の地域においては、一定の技術進歩を想定した上で、主に労働人口の伸び率を参考に GDP 成長率を試算している。その結果、予測期間における世界全体の GDP の平均成長率は 2.8% となった。先進国の成長率が 2.0%

¹ Goldman-Sachs, "Dreaming with BRICs: The Path to 2050", 2003 を参考

であるのに対して、途上国は 4.1%と高水準を維持し、2050 年には先進国に匹敵する経済規模にまで発展する。また、BRICs の平均成長率は 4.6%となっている。

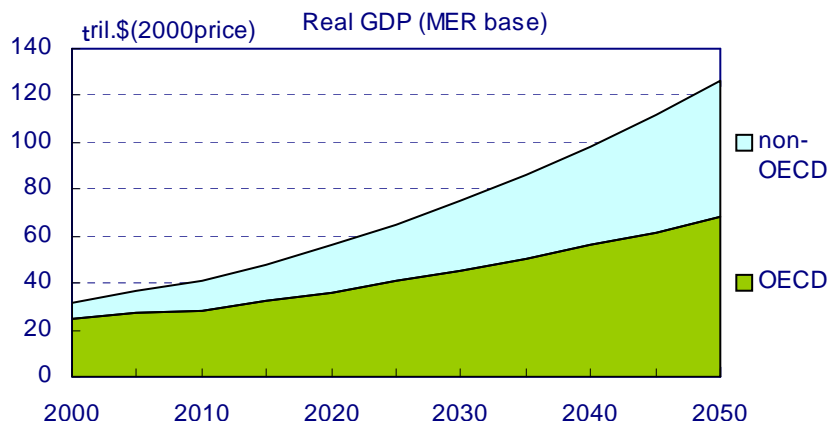


図 3-2 GDP の見通し(為替レートベース)

2050 年という長期のエネルギー需要を見通すにあたり、エネルギーの価格、特に石油価格の想定は非常に重要な要素である。とはいえ、その想定は容易ではなく、なんらかの仮定を置いた上で推計せざるを得ない。Rogner²は、資源の採取量(累計)が増加するに従って資源の採掘コストが上昇する関係を描いている。本見通しにおいても、このコストカーブを参考に、最新の埋蔵量データ³に基づいて将来の油価を試算した。

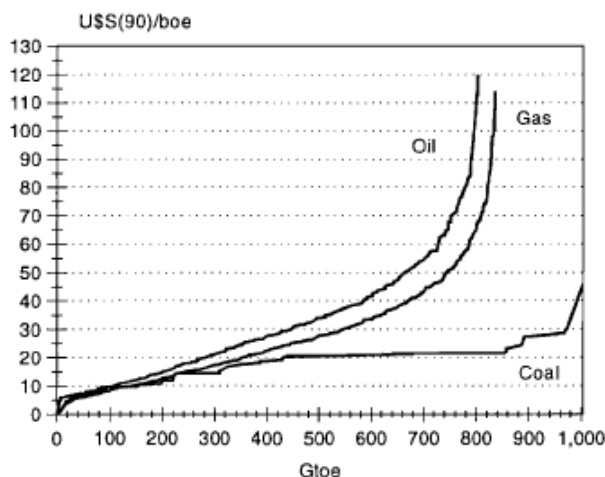


図 3-3 Rogner のコストカーブ(1990 年価格)

² Hans-Holger Rogner, An Assessment of World Hydrocarbon Resources, May 1996

³ 2009 年版の BP 統計では、2008 年末の石油確認埋蔵量を 1 兆 4,087 億バレル(うち、在来型石油 1 兆 2,580 億バレル、カナダのオイルサンド 1,507 億バレル)としており、在来型石油だけの R/P は 42 年となっている。一方、Oil & Gas Journal 誌は 2009 年 1 月 1 日現在の石油確認埋蔵量を 1 兆 3,422 億バレル(非在来型石油を含む、カナダの埋蔵量は 1,781 億バレル)で、2008 年の石油生産量 7,297 万 B/D から計算される R/P は 50.4 年である。いずれにせよ、現在確認されている石油の埋蔵量だけでは 2050 年頃には枯渇することが懸念される。ただし、これらの確認埋蔵量には、今後新規に見出される量、あるいは油価の上昇に伴い採算性が確保されることで埋蔵量に追加される量などは含まれていない。本見通しでは、これらの量も確認埋蔵量に加えた上で将来の油価を想定している。

石油需要の増大に伴い、今後の累積生産量は 1.8 兆バレルに達し、原油価格（OECD 平均輸入価格）は 2050 年には 2007 年実質価格で 200 ドル/バレル、名目価格では 469 ドル/バレルまで上昇すると想定した。天然ガス価格については、現在、発熱量ベースで原油価格 1 に対して 0.6 程度であるが、環境プレミアムなどにより徐々に 0.7 まで上昇すると想定、2050 年には LNG 換算で 1,411 ドル/トン-LNG となる。また、石炭については埋蔵量が豊富であることからほぼ横ばいのまま推移すると仮定した（2050 年 108 ドル/トン。対原油価格は現在の 0.3 から 0.1 まで低下）。

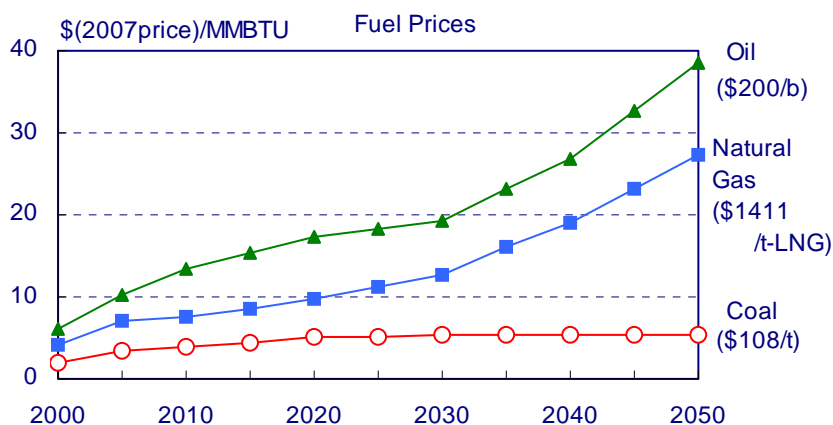


図 3-4 エネルギー価格の見通し(実質価格)

原子力発電は、各国の政策動向・開発動向等を参考に、2006 年の 386GW から 2030 年には 571GW まで発電設備容量が増大すると想定した。特に、中国・インドを中心に、アジア地域で 130GW 程度の発電設備容量の大幅な増大を見込むとともに、ロシアを中心とする旧ソ連地域でも 40GW 近い増加を想定している。一方で、北米地域では 20GW 以下の増加にとどまるとともに、欧州地域では一部の国での脱原子力政策の遂行が今後大幅に遅延すると見られるものの、全体で差し引き 10GW 以上の設備容量が減少すると見込んでいる。2030 年から 2050 年までは、各国で既設炉が廃炉される以上のペースでリプレース及び新設が進み、世界全体で年間 15GW 程度の設備容量の増加が実現すると想定した。この期間には中国・インド等で引き続き大幅な拡大が見られるとともに、東南アジア・中東等の地域でも相応の原子力の導入が実現するものと見込んでいる。

再生可能エネルギーの見通しについては、各国における現在の導入量や導入支援にかかる政策の進捗状況、ならびに政府等による導入計画を参考に想定している。再生可能エネルギーは、今後も水力が中心的な役割を担うが、資源の利用可能性や経済性の改善により、バイオマス・廃棄物、風力発電、太陽光発電の導入も徐々に進展する。現在、世界最大のエネルギー消費国である米国では、発電量に占める再生可能エネルギー(水力・地熱を除く)のシェアは、風力発電の拡大などにより、2005 年の 2%から 2050 年には 8%まで増加する。一方、急速な工業化、都市化を背景に電力需要の大幅増加が見込まれる新興国は、既存火

力が中心となるため、再生可能エネルギー(同)のシェアは 2050 年でも 1~3%にとどまる。

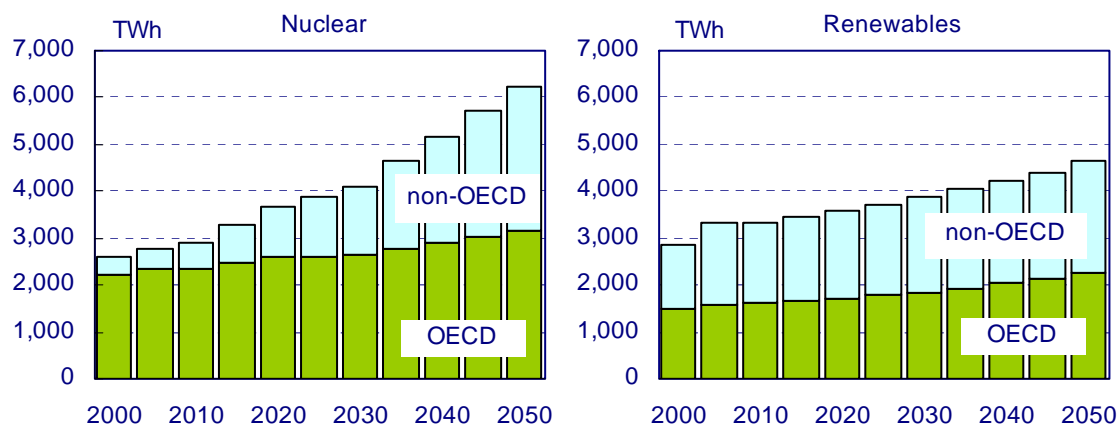


図 3-5 原子力・再生可能エネルギーによる発電量の想定

3.3 一次エネルギー需給の見通し

以上の前提のもと試算された世界の一次エネルギー供給は、2050年に石油換算 185 億トン、現在の約 1.8 倍に拡大する。増分のほとんどが途上国によるものである。省エネルギーの進展もトレンド的に見込んではあるものの、人口の増大、産業の発展、所得水準の向上などを背景に、途上国のエネルギー消費量は、現在の 2.5 倍に拡大する見通しである。

部門別に見ると、産業部門が 1.6 倍であるのに対して、交通部門が 2.0 倍、民生他部門が 1.9 倍に増加する。交通部門の増加は、後述するとおり、輸送需要の拡大、とりわけ自動車輸送の増大が寄与している。民生他部門の増加は、途上国の人口の増加及び生活水準の向上に伴うものである。また、民生他部門を中心に、エネルギー需要の電力化が大きく進み、最終需要の電力比率は現在の 19%から 24%まで上昇する。そのため、発電部門のエネルギー需要も大きく増大している。

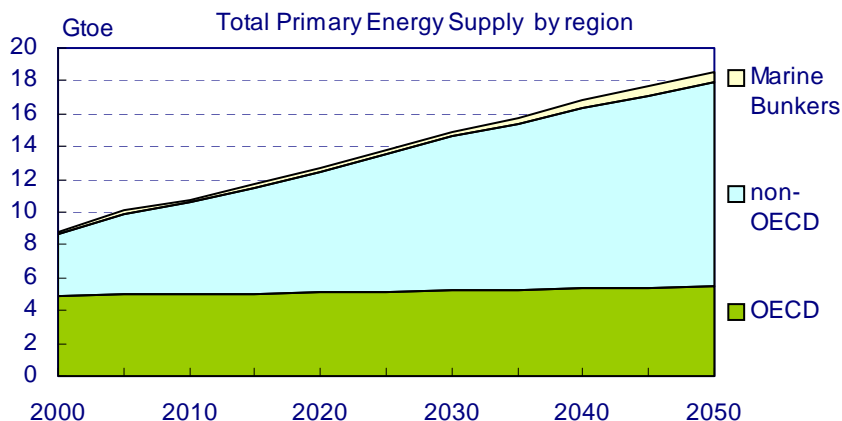


図 3-6 一次エネルギー供給の見通し(地域別)

エネルギー源別では、石油が 1.6 倍、石炭が 1.9 倍、ガスが 1.9 倍に増加し、化石燃料シェアは現在の 89%から 86%まで低下するものの依然として太宗を占める。石油需要の増加は、自動車、航空等の交通需要が牽引役となっており、石炭、ガスは発電用が大幅に増加する。原子力は 2.3 倍に、水力や風力などの再生可能エネルギーも 2.3 倍に増加する見通しであるが、一次エネルギー構成比は、それぞれ 9%、5%程度である。

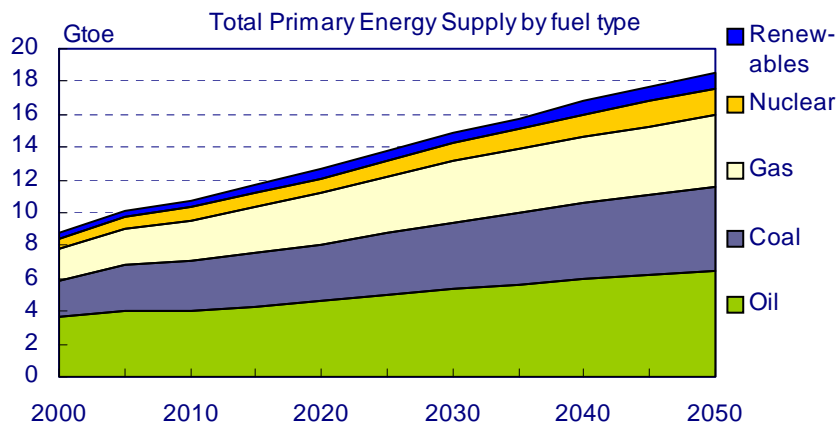


図 3-7 一次エネルギー供給の見通し(エネ源別)

3.4 発電構成の見通し

電力需要の増大に伴い、2050年の発電量は現在の 2.2 倍に増加する。電源別には、火力発電の構成比は現在の 67%から 2050年に 73%まで増加、ますます火力依存が高まる。これは、先進国の火力構成は 62%から 54%まで低下するものの、電力需要が大きく伸びる途上国で 73%から 81%まで増加するためである。再生可能エネルギーによる発電量は、現在の 1.4 倍に増加するが、電源構成比は 18%から 12%まで低下する。

化石燃料電源への構成比は高まるが、そのうちガス発電のシェアが相対的に増えるため、CO₂排出係数(使用端ベース)は、現在の 619g/kWh から 556g/kWh までわずかに低下する。途上国の排出係数は 836g/kWh から 633g/kWh まで大きく下がるが、ガス火力の増大だけでなく、送配電ロスの改善によるところが大きい。

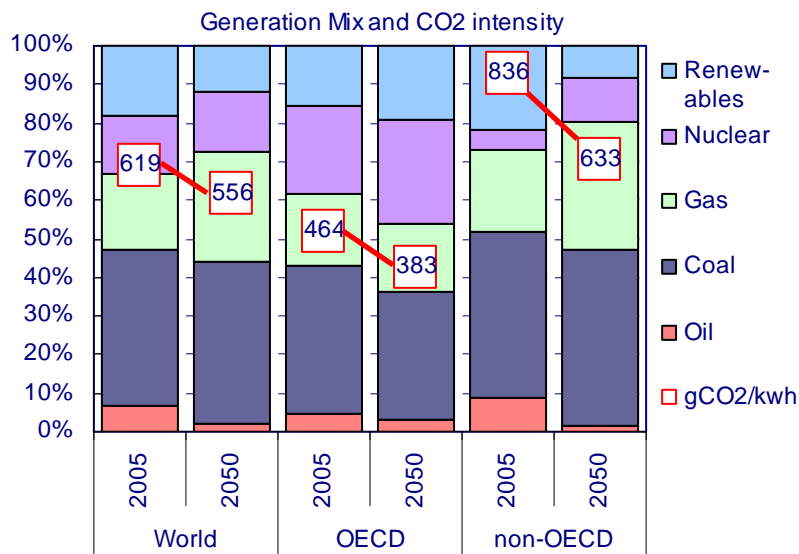


図 3-8 電源構成と CO₂ 排出係数の見通し

3.5 エネルギー起源 CO₂ 排出量の見通し

2050 年の化石燃料の燃焼に伴う CO₂ 排出量は 475 億トン、現在の約 1.8 倍に増大する。先進国は概ね現在をピークに減少していくが、途上国は 2.4 倍に拡大、世界全体の排出量(国際マリンバンカー除く)の 74%を占める見通しである。

部門別には、産業部門が 1.5 倍、交通部門が 1.8 倍、民生他部門が 1.6 倍、発電等の転換部門が 1.9 倍に増加する。しかし、これらの数値は、電力化が進む民生他部門などではやや小さめに表現される。そこで、発電に伴う CO₂ 排出量を各最終需要部門に按分すると、産業部門の排出量は 1.6 倍の増加、交通部門が 1.8 倍、民生他部門が 2.1 倍となる。

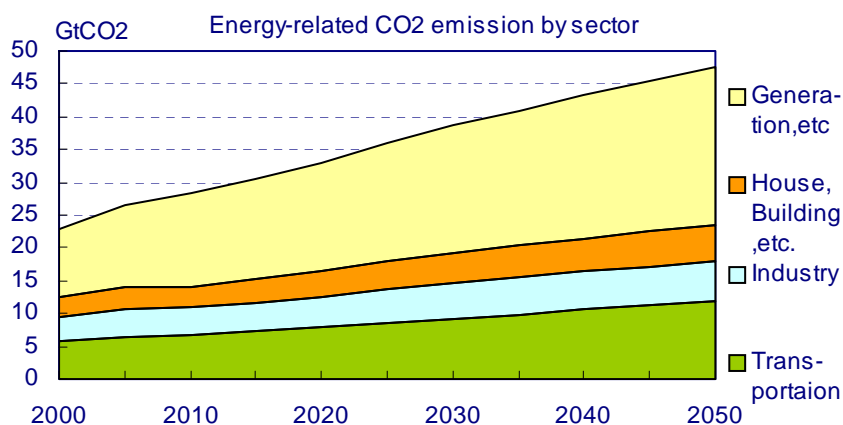


図 3-9 エネルギー起源 CO₂ 排出量の見通し(部門別)

4. 交通部門の詳細分析（レファレンスケース）

4.1 輸送需要の見通し

旅客輸送需要（人キロベース）は、所得水準の向上を背景に、2050 年までに現在の 2.5 倍に拡大、増分のうち約 9 割が途上国によるものである。機関別には、乗用車利用が 2.2 倍、バス利用が 2.9 倍、鉄道利用が 3.0 倍、そして航空利用が 2.8 倍にそれぞれ拡大し、道路輸送の分担率は現在の 83%から 80%へ減少する一方、鉄道、航空の分担率はそれぞれ 8%、11%まで増える見通しである。

生活向上が著しい途上国では、モータリゼーションが急速に進行しており、乗用車利用は 2050 年までに 5.1 倍に拡大する。バスの分担率が現在の 52%から 45%に、二輪車が 13%から 6%に低下する一方、乗用車の分担率は 19%から 30%に増加する。

貨物輸送需要（トンキロベース）は、経済活動の増加により 2.5 倍に拡大する。機関分担率は、利便性の高いトラック利用が 41%から 45%に増加する一方、鉄道利用は 32%から 27%に低下する。船舶利用は 26%から 27%と現在と同程度で推移する。

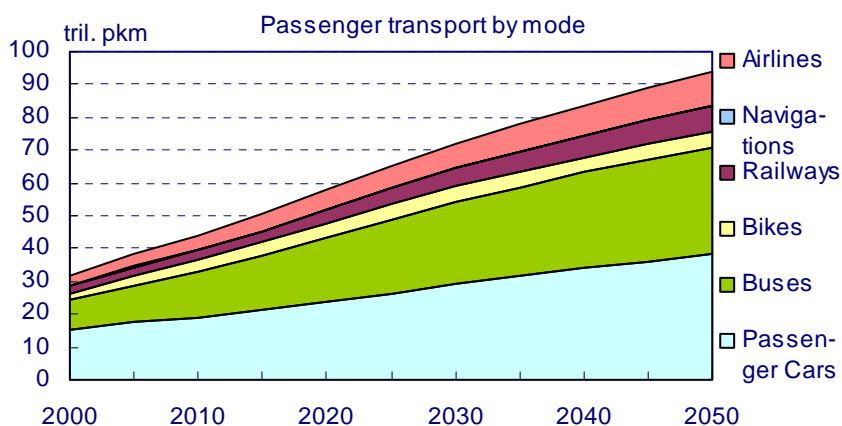


図 4-1 旅客需要の見通し

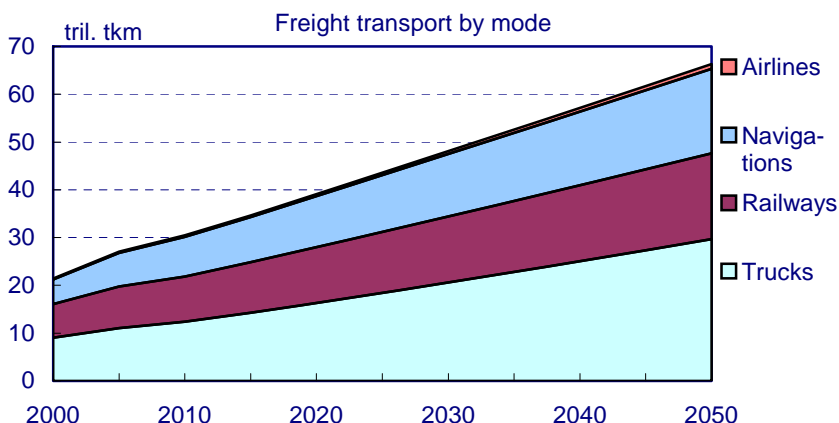


図 4-2 貨物需要の見通し

4.2 自動車保有台数の見通し

輸送需要の拡大を背景に、自動車保有台数（除二輪）は、現在の 9 億台から 2050 年には 23 億台まで 2.7 倍に増加する。台数増分のうち 8 割以上が途上国によるものである。車種別には、乗用車が 2.8 倍（2050 年：20 億台）、バスが 2.5 倍（同 0.4 億台）、トラックが 2.2 倍（同 3 億台）にそれぞれ拡大する。二輪車は、3 億台から 5 億台まで 1.9 倍に増加する。

先進国の保有率（1,000 人当たり保有台数）は、現在の 586 台から 2050 年には 727 台へ上昇するが、一部の国では飽和水準に達していると思われる。一方、途上国では 47 台から 189 台と大幅に上昇するが、いまだ先進国の 4 分の 1 程度の水準であり、2050 年以降も普及拡大の余地は大きい。

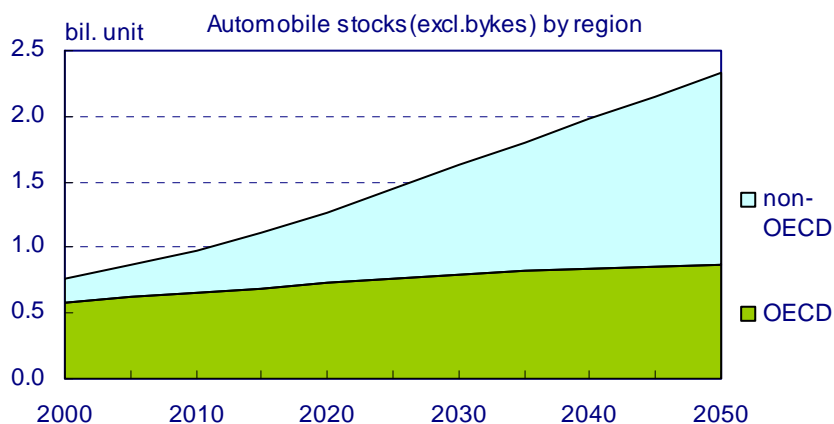


図 4-3 自動車保有台数の見通し

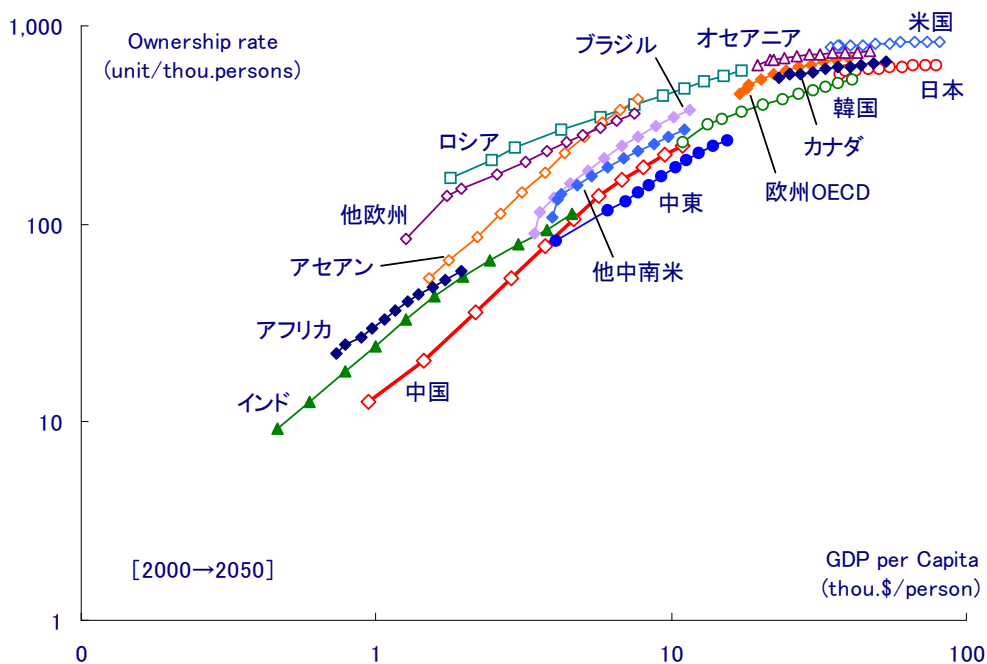


図 4-4 自動車保有率の見通し

4.3 乗用車技術進展の見通し

4.3.1 ICEV 燃費の改善

近年、日米欧で相次いで燃費規制が強化されている。米国では、2007 年 12 月に「エネルギー自給・安全保障法案」が成立し、2020 年の燃費基準 (CAFE) は、従来の 1 ガロン当たり 27.5 マイル (11.7km/L。ガソリン換算、以下同じ) から 35 マイル (14.9km/L) まで引き上げられた。現オバマ政権は、この基準を強化、前倒し (2016 年までに 35.5 マイル/ガロン) することを提案している。EU でも 2009 年 4 月に、欧州委員会提出の CO₂ 排出の規制案が採択され、2012~2015 年までに 1km 走行当たりの CO₂ 排出量を平均 120g (燃費換算で約 20km/L) まで削減することになる⁴。日本では、2007 年 7 月に新しい燃費基準がスタートし、乗用車の平均燃費を 2015 年度に 16.8km/L まで改善しなければならない。

従来エンジン車 (ICEV) の燃費については、先進国は 2010 年代にかけての燃費規制を織り込んでいる。それ以降も、スピードは落ちるものの改善を続け、2050 年までに 2005 比で 41% 向上 (km/L ベース) すると想定した。途上国については、急激な規制強化はなく、徐々に改善していくものと考え、同 37% 向上すると想定した。

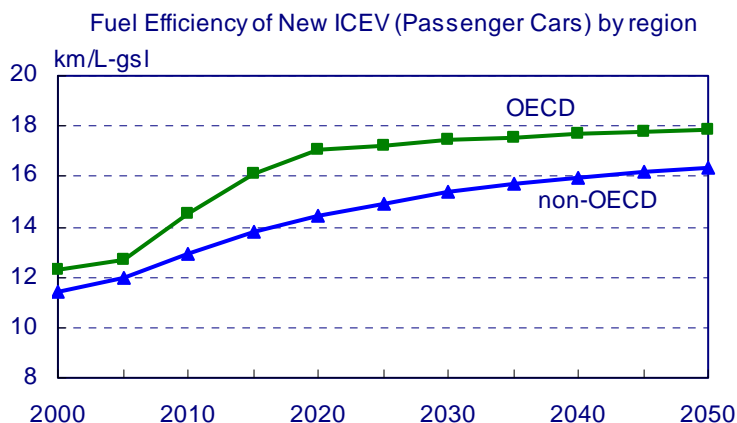


図 4-5 乗用車・新車燃費(内燃機関)の想定

4.3.2 普及モデルの定式化

現在の自動車は内燃機関車 (ICEV) が中心であるが、近年はモーターを駆動源とする車両開発が活発に進められている。電気自動車などのゼロエミッション車 (ZEV) は、ICEV に比べて 3~4 倍程度エネルギー消費効率が高いが、現在の技術ではバッテリー能力に限界があり、走行持続距離に制約がある。ハイブリッド車 (HEV) は、内燃機関とモーターの双方を有し、それぞれの特長を活かした動力技術で、昨今の環境問題、ガソリン価格高騰などを背景に普及し始めている。しかし、HEV、ZEV ともに技術的な課題が多く、とりわけ車両価格は大きなハードルである。また、燃料供給インフラの整備やレアメタルなどの

⁴ エンジンの改良などで自動車メーカーが担う目標値は 130g/km。残りの 10g/km はそれ以外の技術改良、例えば、タイヤの性能向上、エアコンの効率改善、ガソリンに比べ燃料中の炭素含有量が少ないバイオ燃料の利用促進などで達成する。

資源制約といった課題も指摘されている。

将来の車種（動力技術）構成を考える際に、消費者がどのような車種選択を行うか、を考慮しなければならない。「選択確率モデル」は、消費者の選択時における効用の大きさから最も妥当な選択確率（選択構成分布）を推定することができる。

消費者が自動車を購入する際に、3つの要素（①経済性、②環境性、③利便性）を考慮して、最も効用の高い車種を選択するものと仮定する。①経済性は、初期コスト（車両価格）とランニングコスト（燃料費）を総合し、1ドル当たりの走行距離（km/\$）で評価する。量産効果による車両価格の低減や燃費の改善により各年次で経済性は変化する。②環境性は、燃料のCO₂排出量（Well to Wheel ベース）で計測し、CO₂排出量 1kg 当たりの走行距離（km/kgCO₂）で評価する。燃費の改善や電源構成の変化に伴い環境性の評価も変化する。③利便性は、燃料供給インフラや一充填当たりの航続距離などのほか、現在の市場シェアも考慮に入れて総合的に点数化した。

それぞれの要素をガソリン車（GICEV）を 10 点として指数化し、次式のようなコブ・ダグラス型の効用関数を想定する。

$$U_i = \text{経済性}_i^\alpha \times \text{環境性}_i^\beta \times \text{利便性}_i^\gamma$$

（ただし、 $\alpha + \beta + \gamma = 1$ 、 $\alpha, \beta, \gamma \geq 0$ 、 i は車種）

各要素のウェイト（ α 、 β 、 γ ）については、レファレンスケースでは、経済性、利便性のみを考慮し、消費者は環境性を評価しないものとみなし、経済性 $\alpha = 2/3$ 、利便性 $\gamma = 1/3$ と想定する。環境性のウェイトが増せば、より高い費用でも環境に優れた車両の導入が進むが、こうした考え方は次章の技術進展ケースで行うことにする。

各車種について効用（ U_i ）を計算すれば、多項ロジットモデル型の選択確率（ P_i ）は次式で算出される。得られた選択確率は、各年次の販売シェアに相当することになる。

$$P_i = \frac{\exp(U_i)}{\sum_i \exp(U_i)}$$

4.3.3 動力技術の普及見通し

以上の選択確率モデルを利用した動力技術の普及見通しは、ICEV に対して価格競争力があり、インフラ面での制約も少ない HEV の普及が大きく進むという結果になった。世界全体の 2050 年における乗用車の販売構成比は、ICEV が 56%、HEV が 42% となり、ZEV は 2% に過ぎない。先進国では HEV が 46% と ICEV の 51% に匹敵する水準まで導入され、途上国での HEV 普及は先進国よりやや遅れて 39% となる見通しである。

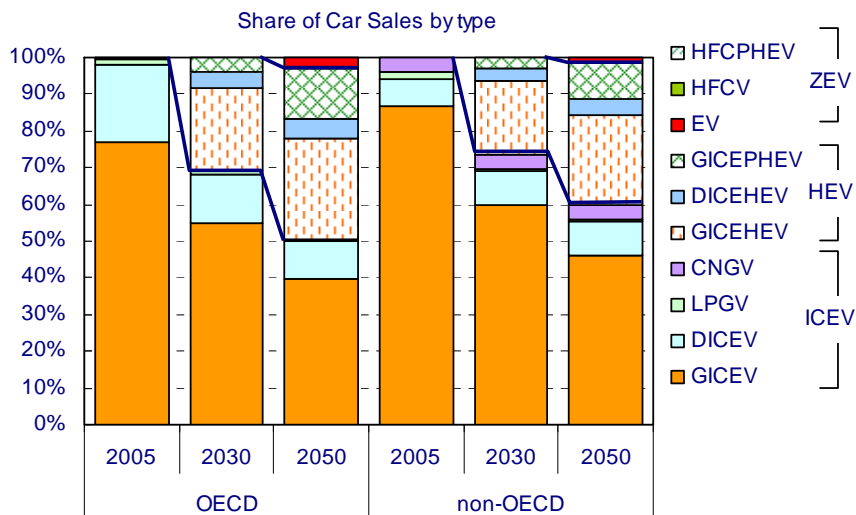


図 4-6 乗用車・新車販売構成比

保有台数ベースでの構成比は、販売時点にやや遅れて変化する。2050年時点での乗用車保有台数に占める HEV の割合は、先進国で 41%、途上国で 34%となる見通しである。

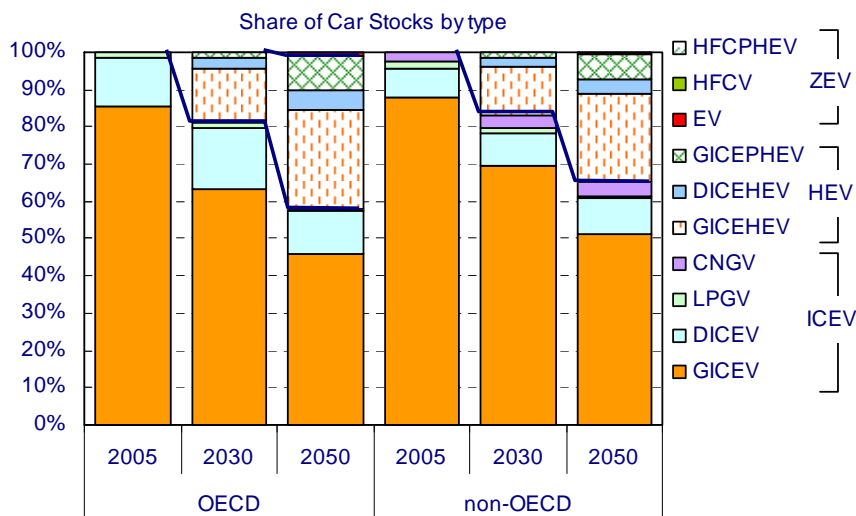


図 4-7 乗用車・保有台数構成比

4.4 ユーザーコスト

新技術を伴うハイブリッド車 (HEV)、ゼロエミッション車 (ZEV) は従来エンジン車 (ICEV) に比べて車両価格が高い。新技術車両の導入が進むと、ユーザーのコスト負担が大きくなる。ユーザー全体の負担額は、現時点における車両価格 (技術固定: 燃費改善なし、HEV・ZEV 普及進展なし) に対する追加負担額として計上できる⁵。HEV、ZEV は、

⁵ 供給インフラに対する投資額は考慮していない。

現在は高価格であるが、普及拡大に伴う量産効果によって将来の価格低下を見込んだ。すでに量産効果の恩恵を受けている ICEV は、さらなる燃費改善技術の導入のために逆にコストが増大するよう想定した。

表 4-1 各車両価格の推計値(小型乗用車)

車種	2005 年の車両価格	2050 年ごろのコスト推計
ガソリン車[GICEV]	\$13,600	\$14,000～\$15,600
ガソリンハイブリッド車[GICEHEV]	\$17,600	\$15,000～\$16,500
ディーゼル車[DICEV]	\$16,600	\$17,000～\$18,400
ディーゼルハイブリッド車[DICEHEV]	\$19,600	\$18,600～\$20,000
LP ガス車[LPGV]	\$16,400	\$16,800～\$18,400
天然ガス車[CNGV] 注1	\$15,600～\$16,900	\$16,000～\$18,600
電気自動車[EV]	\$44,000 注2	\$24,900～\$25,500
燃料電池自動車[HFCV]	\$136,200	\$32,400～\$33,900
プラグインハイブリッド車[GICEPHEV]	\$37,000	\$17,400～\$18,900
プラグイン燃料電池車[HFCPHEV]	\$154,300	\$41,700～\$43,200

(注 1) 中南米などではガソリン車からの後付キットが主流。

(注 2) 2010 年の車両価格。バッテリー交換費用は含まない。

一方、燃費の良い新技術車両は、従来車に比べてランニングコスト（燃料費用）を抑制することができる。技術固定時に対する燃料費用の減少分を、省エネメリットとして計上する。ランニングコストは使用する期間すべてに掛かるものであるが、一般に消費者が初期費用を回収しようとする年数（投資回収年数）は数年程度である⁶。ここでも、省エネメリットを計算する際に用いた年数は、地域によって異なるが 3～5 年程度とした。

初期追加コストから省エネメリットを差し引いた分が、実際にユーザーが負担するコストとなる。レファレンスケースでも高額な新技術車両の導入が進むため、世界全体の初期追加コストは 2050 年までの累積で 4.7 兆ドルとなる。一方、新技術によって浮いた燃料費用は 4.6 兆ドルとなり、差し引き 0.1 兆ドルがネットのユーザーコストである。これは世界全体の GDP の 0.002% に相当し（先進国計、途上国計も同程度）、概ねコスト負担が無い状態と言える。年次別に見てみると、量産効果が小さい導入開始期は初期コストが省エネメリットを上回っているが、徐々に車両価格の低下や燃費改善が進んでくると、省エネメリットの方が上回るようになる（ネガティブコスト）。

⁶ 日本における法定耐用年数は、乗用・貨物用途、小型・大型などで異なるが、3～5 年程度となっている。

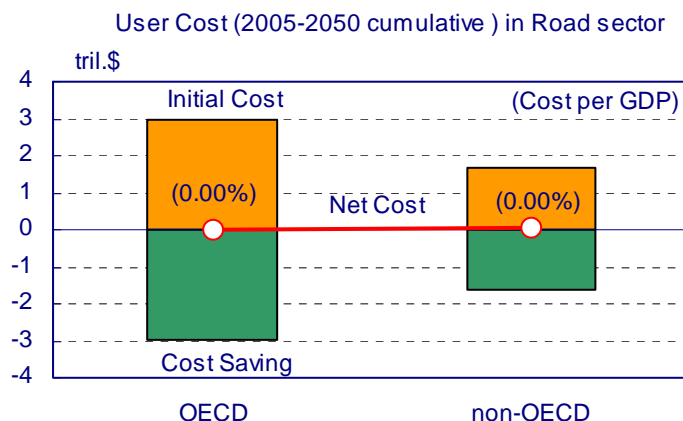


図 4-8 道路部門のユーザーコスト(2005-2050 年累積)

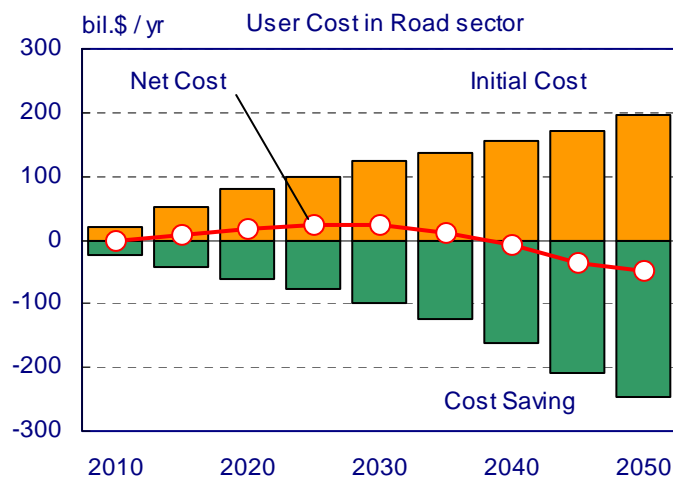


図 4-9 道路部門のユーザーコスト

4.5 エネルギー需要・CO₂ 排出量

2050 年の交通部門のエネルギー需要は、現在の 2.0 倍に増加、CO₂ 排出量 (Well to Wheel ベース) は、電源構成の低炭素化などにより、エネルギー需要の伸びよりもやや低い 1.9 倍に増加する見通しである。先進国の CO₂ 排出量は現在より 4% 減少するものの、途上国は 3.0 倍に拡大する。

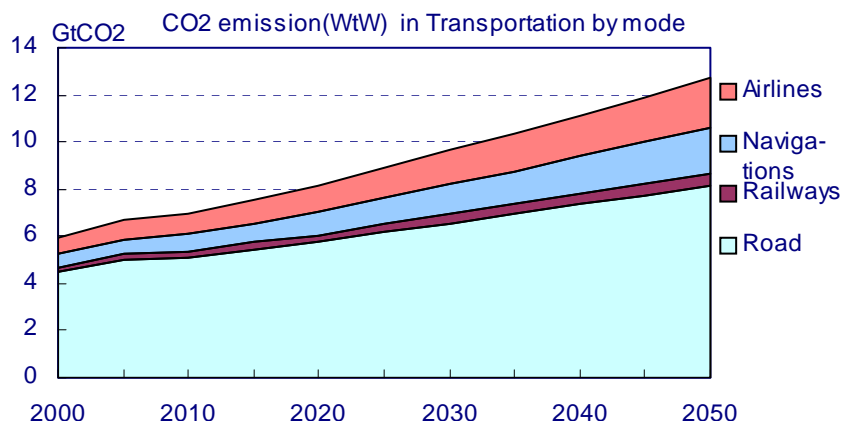


図 4-10 エネルギー起源 CO₂ 排出量の見通し(交通部門)

交通部門の 7 割以上を占める道路部門（自動車・二輪車）のエネルギー需要は 1.7 倍、CO₂ 排出量は 1.6 倍に拡大する。途上国に限れば、CO₂ 排出量は 3.0 倍に増大する。道路部門の半分を占める乗用車からの CO₂ 排出量は 1.4 倍、途上国では 3.8 倍に増大する。

輸送需要の拡大により、輸送機関の主燃料でもある石油への需要も大きく増大する。世界全体の石油需要は現在の 8,000 万 b/d から 2050 年には 1 億 2,900 万 b/d まで増大するが、増加分の約 7 割が交通部門、4 割強が道路部門による需要である。

表 4-2 石油需要の見通し(単位: Mb/d)

	2005 年	2050 年	増減分
石油需要	80	129	+49
交通部門	41	76	+34
OECD	24	23	-2
非 OECD	14	41	+27
道路部門	31	53	+22
OECD	19	18	-1
非 OECD	11	35	+24

注) 国際マリンバンカーを含む

5. 自動車部門における技術進展への展望

5.1 技術進展の考え方

道路部門における省エネルギー、省 CO₂ 対策としては、自動車単体対策（燃費改善、代替燃料の使用など）のほか、輸送需要の抑制（需要自体の抑制と公共交通機関へのモーダルシフトなど）や ITS 等を駆使した交通流対策やエコドライブの普及などがある。本稿では、自動車単体に対する技術進展（HEV、ZEV の普及促進）のみを対象に分析を行うことにする。しかし、今後の技術開発、技術進歩、実用化の時期、導入の進み方など、技術進展の度合いを正確に見通すことは極めて難しい。

そこで、技術進展ケースでは、各種動力技術が市場に導入される程度について複数のケースを想定する。ここでは、追加費用（初期コストから省エネメリットを控除した費用）の大きさに応じて、複数のケースを展開することにした。追加費用の大きさは、GDP 比 0.1%、0.2%、0.3%とし、道路部門にすべて投入することを前提に、想定する費用に達するまで、選択確率モデルを使用して HEV、ZEV の導入促進を図ることにする。

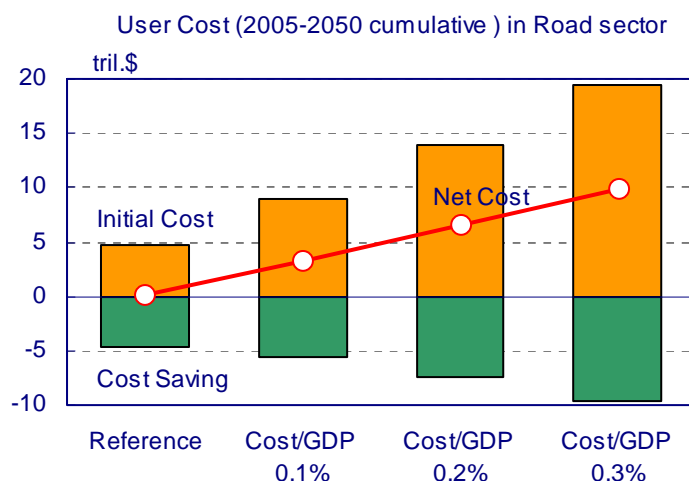


図 5-1 道路部門のユーザーコスト(2005—2050 年累積)

選択確率モデルでは、「レファレンスケース」においてゼロとしていた環境性のウェイトを想定する費用に達するまで高めていく。これは、経済性だけでは選択されない新技術車両を、政府の補助金などによって選択を促す効果と同等であると考えられる。補助金の場合、追加的な費用は政府が支出することになるが、その財源を考えれば最終的には国民の負担である。

乗用車の新車販売に占める新技術車両のシェア（2050 年）は、「レファレンスケース」では HEV が 42%、ZEV が 2%であったが、総額 3.2 兆ドルの追加費用を要する「GDP 比 0.1%

⁷ IEA（国際エネルギー機関）による“Energy Technology Perspectives (2008)”では、2050 年までに CO₂ 排出量を現状水準まで引き戻す ACT MAP シナリオで GDP の 0.4%、CO₂ を半減させる BLUE MAP シナリオで同 1.1%に相当する額の追加投資が必要としている。しかし、省エネルギーによるコスト低減分は控除されていない。本分析で想定している GDP 比 0.3%のコストは、省エネメリットを控除した費用であること、道路部門に限定された費用であることを考えれば、かなり大規模な費用負担であると言える。

ケース」では、HEV が 71%、ZEV が 8% となった。ZEV のほとんどが EV である。6.5 兆ドルのコストを要する「GDP 比 0.2% ケース」では、HEV が 73%、ZEV が 13% となり、9.8 兆ドルを要する「GDP 比 0.3% ケース」では、HEV が 73%、ZEV が 21% となる。「0.3% ケース」での ICEV の販売シェアは、先進国で 2%、世界全体でも 6% 程度と、ほぼ新技術車両しか販売されていないシナリオと考えられる。

新技術車両の普及の進み方を見てみると、車両価格が相対的に安いガソリンハイブリッド車 (GICEHEV) から導入が進み、次にプラグインハイブリッド車 (GICEPHEV)、そして電気自動車 (EV) の順に導入されていくのがわかる。しかし、EV は航続距離、インフラなどの問題から導入ポテンシャルは限定的である。

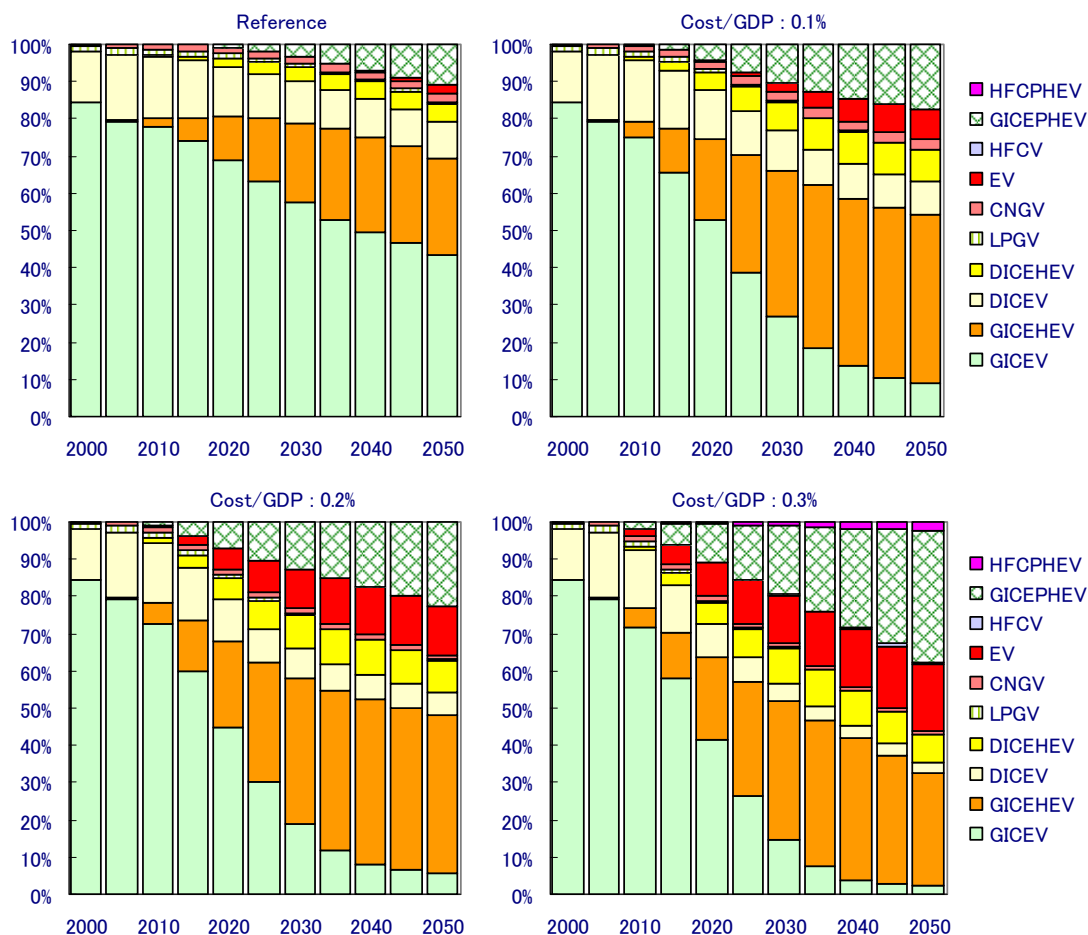


図 5-2 乗用車・販売台数構成比

自動車全体 (乗用車+貨物車) の保有構成比を見ると、「レファレンスケース」での HEV の構成比は 35%、ZEV は 1% であったが、「0.3% ケース」では HEV が 71%、ZEV が 18% まで上昇する。地域別では、HEV の構成比は先進国、途上国ともに 71% であるが、その内訳は大きく異なり、先進国ではプラグインハイブリッド車 (GICEPHEV) の導入が大きく

進んでいるのがわかる（先進国 37%、途上国 19%）。ZEV についても先進国では導入が早く 22%を占めている（途上国 15%）。

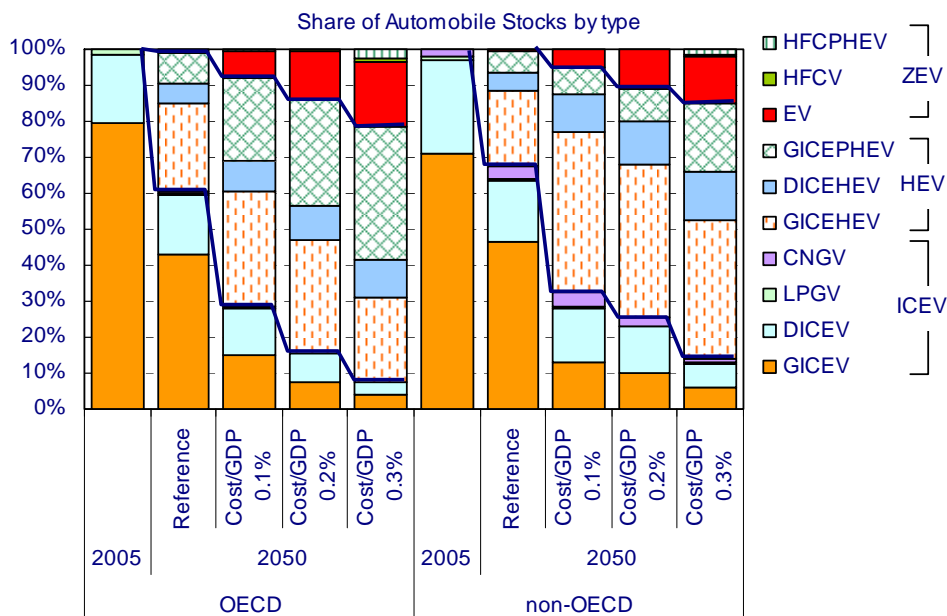


図 5-3 自動車・保有台数構成比

表 5-1 技術進展のまとめ(2050 年時点)

	保有構成比		保有燃費改善率	
	乗用車 (HEV、ZEV)	貨物車 (HEV、ZEV)	乗用車 (05 年比)	貨物車 (05 年比)
2005 年	0%、0%	0%、0%	-	-
レファレンス	37%、1%	20%、0%	21%	18%
0.1%ケース	67%、6%	37%、5%	30%	26%
0.2%ケース	69%、13%	46%、8%	37%	31%
0.3%ケース	72%、18%	62%、15%	41%	37%

「0.3%ケース」における乗用車の新車燃費 (L/100km) の改善率は、2030 年で 45% (2005 年比、以下同じ)、2050 年で 51%の改善となっている。FIA (国際自動車連盟) 等は、燃費改善イニシアティブ『50 by 50⁸』の中で、2030 年までに 50%の改善 (2050 年は 50% プラスα程度) が可能と考えている。また、本分析の保有燃費の改善率は 2050 年で 41% である。一方、『50 by 50』が可能としているのは 50%の改善であるが、これには新車に対する技術的な対策だけでなく、交換用タイヤなどのアフターマーケット商品における効率

⁸ FIA Foundation, International Energy Agency(IEA), International Transport Forum(ITF) and United Nations Environment Programme(UNEP), “50 by 50 Global Fuel Economy Initiative”, 2009

化やエコドライブなどによる方策も含まれている。これらの対策も含めれば、本分析の結果も概ね整合的な値となっていると思われる。

5.2 CO₂ 削減の費用対効果

以上の追加費用をかけて技術進展を図った場合の世界のエネルギー起源 CO₂ 排出量、石油需要の削減効果を測定した。

世界の GDP の 0.3%、累積で 9.8 兆ドルのコストをかけると、2050 年時点の道路部門からの CO₂ 直接排出量 (Tank to Wheel) は、レファレンスケースに比べて 26 億トン減少し (35%減)、ほぼ 2005 年水準に抑えることができる。保有台数に占める新技術車両の割合は約 9 割 (HEV : 71%、ZEV : 18%) に達するが、輸送需要の増加分を相殺できるととどまる。現在の水準を下回るようなところまで削減をするためには、エネルギー消費効率の優れているモーター駆動、すなわち、車両の電動化を更に進める必要がある。しかし、そのためには低価格・高密度の革新的なバッテリー開発が不可欠となってくる。

Well to Wheel ベースの CO₂ では、レファレンスケースに比べて 14 億トン、18%の減少 (2050 年時点) にとどまり、2005 年比では 1.3 倍の増加となる。これは、電動化の進展により、発電部門における CO₂ 排出量が増えているためである。すなわち、費用をかけて自動車の電動化を進めても、発電部門での排出を考えると削減ポテンシャルは限定的である。

一方、2050 年時点の道路部門における石油需要は、レファレンスケースに比べて 1,800 万 b/d 削減できる。レファレンスケースでは 2005 年比で 2,200 万 b/d 増加するところを、400 万 b/d の増加に抑えることができる。

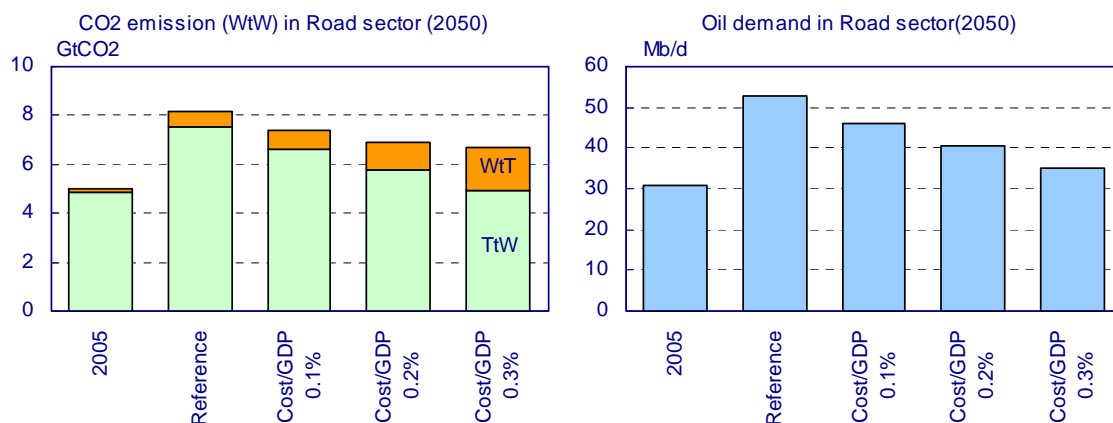


図 5-4 エネルギー起源 CO₂ 排出量及び石油需要の削減見通し(道路部門)

技術進展にかけた費用総額を削減された累積 CO₂ 排出量で除せば、CO₂ を削減するための平均費用が算出できる。「GDP 比 0.1%ケース」では 243 ドル/トン・CO₂ で、「0.3%ケース」になると 322 ドル/トン・CO₂ まで上昇する。削減を進めていくと平均費用は上昇する。

これは、より多くの削減を進めるにあたり、新技術車両の早期導入が必要となるためである。すなわち、車両コストが高い市場導入初期段階では、CO₂ 削減費用は非常に高い。しかし、量産効果により次第に車両コストが低下してくると、削減費用も下がってくる。どのケースも 2025～2030 年ごろには同レベルの削減費用となり、2050 年には 100 ドル/トン-CO₂ 程度まで低下している。

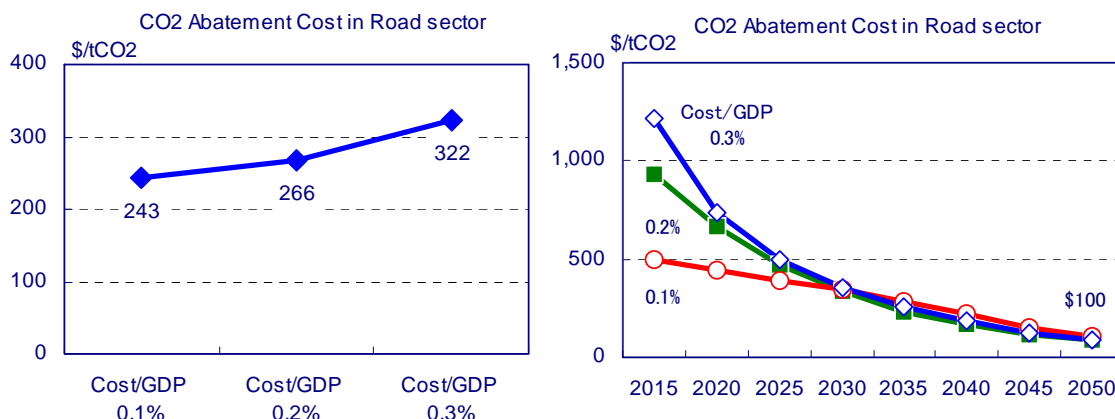


図 5-5 道路部門の CO₂ 削減コスト

いずれにしても、現在のいくつかのカーボン市場における取引価格は、20～40 ドル/トン-CO₂ 程度であることを考えれば、非常に高いコストであるといえる。また、IEA（国際エネルギー機関）も、2050 年までに CO₂ を半減させるシナリオ⁹において、限界削減費用は 200～500 ドル/トン（技術全体の平均費用は 38～117 ドル/トン）としており、道路部門での削減費用が最も高いことを示している。

5.3 発電部門の低炭素化による効果

前節までの分析結果では、Tank to Wheel での CO₂ 排出量や石油需要の削減には効果があるが、Well to Wheel ベースでみた道路部門における CO₂ 削減ポテンシャルは小さく、また必要な削減費用も大きいことが分かった。エネルギー消費効率の優れた電動化を進めても、発電部門での CO₂ 排出を考えると世界全体での削減ポテンシャルはそれほど大きくない。すなわち、発電部門の CO₂ 排出係数（発電量当たりの CO₂ 排出量）の大幅な改善が重要となる。発電部門の低炭素化が、道路部門の CO₂ 削減にどの程度寄与できるのか確認する必要がある。

5.3.1 発電部門の低炭素化技術

ここでは、発電部門の低炭素化に寄与する技術として、①火力発電の効率改善、②再生

⁹ “Energy Technology Perspectives (2008)” における BLUE MAP シナリオ。

可能エネルギー電源の追加導入、③原子力発電の追加導入、④CCS（炭素回収・貯留技術）の導入を考える。以下、「電源低炭素化ケース」における CO₂ 削減効果及び追加コストを確認していく。

①火力発電の効率改善

火力発電については、従来の蒸気タービンによる発電に、ガスタービンによる発電を加えたコンバインドサイクル（CC）による効率改善が知られている。ガス温度がより高い 1,500~1,700°C 級の CC や、IGCC（石炭ガス化複合発電）など普及により、2050 年における火力発電の効率は、レファレンスケースに比べて世界平均で 5.7%ポイントの向上が見込まれる。このときの追加的な初期投資コストは、総額 0.3 兆ドルであるが、効率向上により 2.0 兆ドルの燃料費削減（投資回収年数を 10 年として計算。以下同じ）が見込まれる。ネットのユーザーコストはマイナス 1.8 兆ドル（ネガティブコスト）となり、CO₂ の平均削減コストはマイナス 78 ドル/トン・CO₂ となる。

②再生可能エネルギー電源の追加導入

自然エネルギーを中心とした非化石電源は、物理的なポテンシャルは膨大であるが、供給が不安定であることと導入コストが高いことが課題である。ここでは、技術進展や量産効果などによるコスト低減が着実に進み、太陽光発電を除けば、火力発電と十分に価格競争できることを想定している。このとき、レファレンスケースの 2 倍に相当する規模の導入が見込まれ、追加投資コストは総額 6.6 兆ドルに上る。火力発電の代替による化石燃料コストの削減を考慮すると、CO₂ の平均削減コストは 49 ドル/トン・CO₂ となる。

③原子力発電の追加導入

原子力発電は、自然エネルギーと異なり、安定した電力供給が可能な非化石電源である。そのため、途上国を中心に多くの国が大規模な導入計画を立てている。ここでは、中国、インドでは国の目標計画に近い大幅な拡大を見込み、東南アジア・中東等でも着実な導入が進むとした。また、脱原子力政策を採用している欧州でも、環境問題への対応から原子力の廃炉が延期されるものと想定している。このときの追加投資コストは、総額 0.3 兆ドルであるが、火力発電に比べて相対的に発電コストが低いため、CO₂ の平均削減コストはマイナス 40 ドル/トン・CO₂（ネガティブコスト）となる。

④CCS の導入

発電部門の低炭素化技術で期待されているのが、CCS（炭素回収・貯留技術）である。火力発電から排出される CO₂ を大気に放出せず、地中などに貯留する技術であるが、長期にわたって安定的に閉じ込めることができるかどうかなど、現在各地で実証実験が行なわれているところである。

CCS 技術はコストも高く、システムの方法にもよるが、CO₂の回収・貯留コストは 40～90 ドル/トン-CO₂ 程度とされている。商業ベースとして広く普及していくためには、30～40 ドル/トン-CO₂ 程度まで下がる必要がある。ここでは、世界の GDP の 0.1% に相当する約 3.4 兆円の初期投資を行うものと想定した。このとき、2050 年には火力発電設備（レファレンスケース）の約 5 割に導入される計算となる。

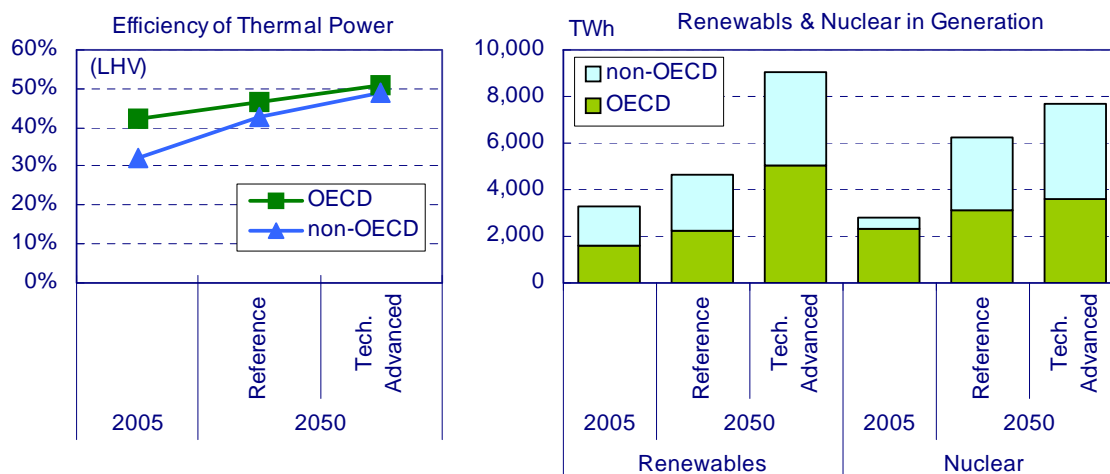


図 5-6 発電部門における低炭素化技術の導入量

5.3.2 電源低炭素化による世界の CO₂ 削減効果

以上の低炭素化技術を同時に導入すると、2050 年の火力電源の構成比は、レファレンスケースの 73% から 54% まで低下するが、依然として化石燃料電源が主流である¹⁰。しかし、火力発電の 5 割以上の設備に CCS が導入されることが想定されている。発電部門の CO₂ 排出係数は、レファレンスケースの 556g/kWh から電源の低炭素化で 367g/kWh まで低下、さらに CCS を導入すると 189g/kWh まで低下する。

世界全体の 2050 年時点のエネルギー起源 CO₂ 排出量は、レファレンスケースの 475 億トン（2005 年比 1.8 倍）に対して、道路部門のみの技術進展（GDP 比 0.3% ケース）ではわずか 2% しか減少しないが、電源の低炭素化によって 13%、CCS を導入するとさらに 26% まで減少する。道路部門と発電部門で同時に技術進展が行なわれた場合には、CO₂ 排出量はレファレンス比で 29% 減、2005 年比で 1.3 倍まで低下する。

また、CO₂ を削減するための追加的な初期投資額は、道路部門が総額 19.4 兆ドルに上るのに対して、発電部門は 10.6 兆ドルと半額である。燃料費の削減分を控除したユーザーコストは、道路部門の 9.8 兆ドルに対して、発電部門は 2.9 兆ドルと 3 分の 1 にとどまる。明らかに費用対効果は発電部門のほうが優れていることがわかる。

発電部門は設備規模が大きく、その分多額の投資が必要となるが、CO₂ 削減効果も大き

¹⁰ 産業部門や民生部門などではレファレンスケース以上の省エネルギーが考慮されていないことに留意が必要。

い。一方、自動車の費用対効果は各車両に分散されており、量産効果による価格低下を見込んでも、CO₂削減に対する規模の効果が得られにくいものと考えられる。発電部門でも、高効率火力発電、原子力発電による CO₂削減費用はマイナスであるが、相対的に小規模な太陽光や風力を中心とする再生可能エネルギー電源の削減費用はプラスとなっているのは、同様の理由によるものと思われる。

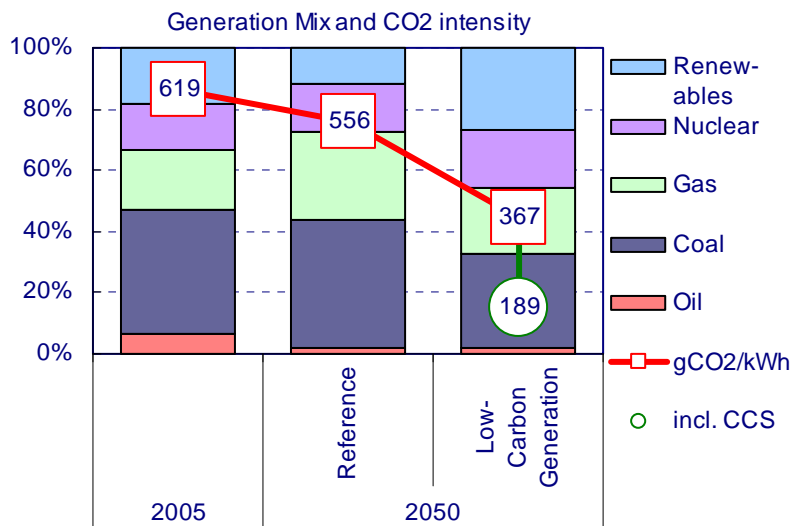


図 5-7 電源構成と CO₂ 排出係数

5.3.3 自動車部門の削減効果・費用の再計算

次に道路部門への影響を見てみる。Well to Wheel ベースの CO₂排出量は、レファレンスケースの 81 億トン（2005 年比 1.6 倍）に対して、道路部門の技術進展（GDP 比 0.3% ケース）では 18% 減少（同 1.3 倍）、さらに発電部門の低炭素化によって 29% まで減少（同 1.2 倍）する。しかし、自動車部門の電化の割合は 11% 程度（エネルギー消費ベース）であり、削減余地はそれほど大きくない。車両の電動化が進めば電源低炭素化の効果は更に大きくなると見込まれるが、その場合には追加コストも更に大きくなるであろう。

道路部門の CO₂削減コストは、322 ドル/トン・CO₂（GDP 比 0.3% ケース）から、電源低炭素化との相乗効果により 246 ドル/トン・CO₂ まで低下する。発電部門の低炭素化投資により、道路部門の削減コストは 76 ドルも低下することになった。逆に言えば、自動車部門で技術進展を図っても、発電部門が低炭素化を行わなければ、自動車ユーザーの負担（あるいは財政負担）はその分だけ大きくなることを意味している。

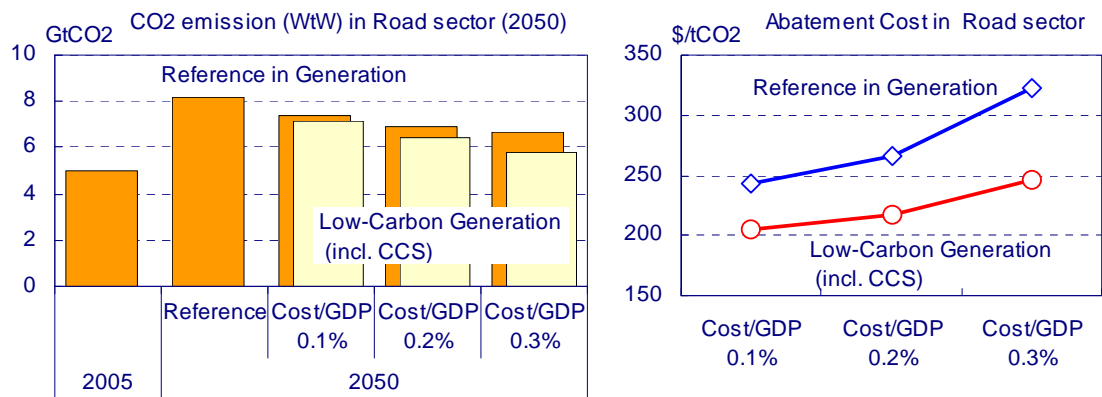


図 5-8 道路部門の CO₂ 排出量と削減コスト

6. おわりに

「IEEJ2050 モデル」を用いて、経済情勢や技術進展などをフォワードキャストによって見込み、将来のエネルギー需要、化石起源 CO₂ 排出量の予測分析を行った。現行の技術体系やエネルギー政策をベースにした趨勢的な想定（レファレンスケース）の下では、世界のエネルギー需要は 2050 年には現在の 1.8 倍に増加、CO₂ 排出量も 1.8 倍に増加すると予測された。また、最も重要なエネルギー源と言える石油に対する需要も、途上国を中心とする道路部門などでの急増により、現在の 1.6 倍に増大する。このような結果は、エネルギー資源逼迫、地球温暖化問題の観点から持続可能ではない恐れがある。そのため、なんらかの対策を早期に打ち出す必要があろう。

本分析では、自動車輸送部門に焦点を当てて CO₂ の削減ポテンシャルを検討してきた。世界の GDP の 0.3%、総額 9.8 兆ドルのコストをかけると、2050 年時点の道路部門からの直接排出量（Tank to Wheel）は、ほぼ 2005 年水準に抑えることができる。しかし、Well to Wheel ベースでは 2005 年比 1.3 倍の増加となってしまう（レファレンス比 18%減）。これは、車両の電動化によって発電部門の CO₂ 排出量が増えるためである。大幅な CO₂ 削減のために車両の電動化が欠かせないとすれば、発電部門の低炭素化が極めて重要となる。

発電部門でも低炭素化を図った場合（CO₂ 排出係数はレファレンス比 66%減）、2050 年の道路部門の CO₂（Well to Wheel）は 2005 年比では 1.2 倍に抑制されると試算された（レファレンス比 29%減）。技術進展ケースでも、自動車の電化の割合はエネルギー消費ベースで 1 割程度であり、電源低炭素化の効果はそれほど大きくはない。車両の電動化が進めば、電源低炭素化の効果も大きくなるが、その場合には追加コストも大きくなるだろう。道路部門の平均削減コストは 200~300 ドル/トン・CO₂ 程度と非常に高く、費用に対する効果は小さいと言わざるを得ない。これは、自動車の費用対効果は各車両に分散されているため、CO₂ 削減に対する規模の効果が得られにくいためと考えられる。

今回の分析では、費用に対する効果が小さくても新技術車両の普及を進めることで、CO₂ 排出量及び石油需要の削減を目指したが、途上国を中心とする輸送需要の増大分をせいぜい相殺できる程度にとどまった。しかし、自動車技術の進展については現行の技術体系の延長線で考えている。量産効果によるコスト低減は見込んでいるが、2050 年という長期的な視点を考えれば、既存技術と一線を画す低価格技術の開発・普及が進む可能性もある。とりわけ、低価格・高密度の革新的なバッテリー開発が、車両の電動化を大きく進めるためには不可欠であろう。輸送需要の増大が見込まれる道路部門において、将来の CO₂ 排出量を現状以下の水準まで削減するには、革新的技術の出現に期待することになる。

道路部門における CO₂ 削減には、統合的な取り組みを推進していくことが重要である。自動車メーカーが任を負う燃費改善技術の開発・普及だけでなく、本分析では対象としていないが、バイオ燃料の導入や交通流の改善、エコドライブなどもある。もちろん、発電部門の低炭素化もその一つである。こうした対策を同時に行っていけば、さらなる CO₂ 削減が可能である。また、新技術車両の普及にかかる費用負担については、自動車メーカー

によるコスト低減努力も不可欠であるが、政策的な補助金支援なども必要となろう。とりわけ、量産効果によるコスト低下を見込むには、補助金支援による初期需要の創出が肝要である。自動車輸送部門における地球温暖化対策は、自動車メーカー、燃料や発電などの関係業界、行政、自動車ユーザーなどがそれぞれの役割を果たし、社会全体で統合的に取り組むことでより大きな成果が期待できる。

なお、今回の分析では、車両の電動化と電源の低炭素化を中心に分析を行っている。道路部門の温暖化対策として重要なバイオ燃料や、燃料電池自動車及び水素製造の動向についての分析は今後の課題としたい。

7. 参考文献

- 1) (財)日本エネルギー経済研究所「アジア/世界エネルギーアウトック 2009」(2009 年 10 月)
- 2) International Energy Agency (IEA), "Energy Technology Perspectives 2008", 2008
- 3) International Energy Agency (IEA), "World Energy Outlook 2008", 2008
- 4) International Energy Agency (IEA), "Transport, Energy and CO₂: Moving towards Sustainability", 2009
- 5) Energy Information Administration(EIA), Department of Energy, "International Energy Outlook 2009", 2009
- 6) FIA Foundation, International Energy Agency(IEA), International Transport Forum(ITF) and United Nations Environment Programme(UNEP), "50 by 50 Global Fuel Economy Initiative", 2009
- 7) 金成修一、紀伊雅敦、末広茂「将来自動車技術導入による CO₂ 削減効果と費用分析」(2009 年)
- 8) (社)日本自動車工業会「世界の道路交通セクターにおける CO₂ 削減取り組みの低減」(2008 年)
- 9) (財)地球環境産業技術研究機構「投資回収年数(もしくは割引率)に関して」(2009 年 3 月)
- 10) United Nation, "Population Estimates and Projections:The 2008 Revision"
- 11) 国立社会保障・人口問題研究所「日本の将来推計人口」(2006 年 12 月)
- 12) 行政院経済建設委員会「中華民国台湾 97 年至 145 年人口推計」(2008 年 9 月)
- 13) Hans-Holger Rogner, "An Assessment of World Hydrocarbon Resources", 1996
- 14) Goldman-Sachs, "Dreaming with BRICs: The Path to 2050", Global Economics Paper No: 99,2003

お問合せ : report@tky.ieej.or.jp