

次世代自動車普及によるグローバル・ベネフィット
に関するモデル分析

竹下 貴之

ITEC Working Paper Series

14-07

March 2015

次世代自動車普及によるグローバル・ベネフィットに関する
モデル分析
Model Analysis of the Global Benefits of the Penetration
of New Road Vehicle Technologies

同志社大学 技術・企業・国際競争力研究センター
ワーキングペーパー14-07

竹下 貴之
長崎大学 環境科学部 准教授
852-8521 長崎県長崎市文教町 1-14
Tel/Fax: 095-819-2738
E-mail: takeshita@nagasaki-u.ac.jp

要旨：

本稿では、運輸部門と同部門への燃料供給を詳細にモデル化した最適化型長期世界エネルギーシステムモデル REDGEM70 を用いて、プラグイン・ハイブリッド自動車、電気自動車、燃料電池自動車といった次世代自動車推進技術の大規模普及が、CO₂ 排出量、大気汚染物質（SO₂, NO_x, PM）の排出量、エネルギー供給安定度にもたらし得る世界レベルでの便益（グローバル・ベネフィット）を 2050 年までの時間範囲で定量評価した。

その結果、まず、次世代自動車推進技術の大規模普及により、世界の総 CO₂ 排出量は削減されるが、その削減幅は小さいことを示した。そして、次世代自動車推進技術の大規模普及による世界の総 CO₂ 排出量の削減効果を大きくするためには、世界の発電部門の低炭素化とクリーンな運輸用燃料の大規模導入を併せて行うことが必要であることを指摘した。

次に、次世代自動車推進技術の大規模普及により、世界の自動車起源の SO₂, NO_x, PM の排出量は大幅に削減されることを示した。しかし、世界の SO₂, NO_x, PM の総排出量を大幅に削減するためには、発電部門に対しても厳しい大気汚染物質排出基準を課すことが不可欠であることを指摘した。

次に、次世代自動車推進技術の大規模普及により、世界の一次エネルギー供給の多様化、世界の一次エネルギー供給に占める石油の比率の大幅な低下といった便益がもたらされることを示した。しかし、次世代自動車推進技術の大規模普及は、それによって増加した電力需要を賄うための化石燃料の地域間貿易の増加の方が、自動車に用いられる石油の地域間貿易の減少より大きくなり、結果として世界の一次エネルギー供給に占める輸入の比率に悪影響を与える可能性が高いことを示した。

このように、次世代自動車推進技術の大規模普及が、CO₂ 排出量、大気汚染物質の排出量、エネルギー供給安定度にもたらし得る世界レベルでの便益を大きくし、確かなものにするためには、発電部門において適切な政策的措置を講じること、及び、自動車部門において、推進技術面に加えて燃料面でも適切な対応を講じることが必要であることを重要な政策的含意として指摘した。

キーワード：次世代自動車推進技術，世界エネルギーシステムモデル，発電部門

謝辞：本研究は科研費基盤研究（B）「次世代自動車の普及政策とそのグローバル・ベネフィットに関する研究」（課題番号：25281071，研究代表者：三好 博昭）の研究成果の一部である。

次世代自動車普及によるグローバル・ベネフィット に関するモデル分析

竹下 貴之

1. はじめに

運輸部門は、2010年において、世界のCO₂排出量の約22%を占め、電力・熱製造(約41%)に次いで二番目に大きいCO₂排出部門である(Ives et al., 2013)。運輸部門からのCO₂排出量の約8割は自動車部門によるものであり、自動車部門は、2011年の世界のCO₂排出量の約17%を占めている(Boey and Su, 2014)。積極的な気候変動対策が講じられない場合(Energy Technology Perspectives 2012 (IEA, 2012a)の4°C安定化シナリオ及び6°C安定化シナリオ、World Energy Outlook 2012 (IEA, 2012b)のNew Policiesシナリオ及びCurrent Policiesシナリオに相当する)、運輸部門は2050年にかけて、全てのエネルギー最終利用部門の中で最大のCO₂排出源であり続けると予測されている。

同様に、運輸部門は大気汚染物質の主要な排出源の一つであり、それらの排出量の多くは自動車部門によるものである(Cofala et al., 2007)。発電所や工場からの大気汚染物質の排出と異なり、自動車からの大気汚染物質の排出は人間の生活環境の近くに集中しているため、人間の健康に大きな悪影響を与えていることが指摘されている(Takeshita, 2011)。技術的に実現可能な最も厳しい大気汚染物質排出基準が課されると想定した場合でも、自動車部門は2030年にかけて、主要なNO_x, PM, COの排出源であり続けると予測されている(Cofala et al., 2007)。

さらに、石油供給の不安定さに対する懸念が高まっている中、運輸部門は、2011年の世界の石油消費量の62.6%を占め(IEA, 2013)、その約8割は自動車部門によるものである(BP, 2014)。運輸部門は2035年にかけて、世界の石油消費量の中で現状と同程度のシェアを占め続けること、自動車部門は2035年にかけて、世界の運輸部門による石油消費量の中で現状と同程度のシェアを占め続けることが予測されている(IEA, 2013; BP, 2014)。

つまり、自動車部門は、現在及び中長期的に、気候変動、大気汚染、エネルギーセキュリティ等、現在人類が直面している重要な問題の主因である。したがって、同部門における新技術の開発と導入、同部門に対する政策的措置の強化、等により、同部門が上述の諸問題に与える悪影響を軽減するための取り組みは決して欠かすことはできないと言えよう。

そこで、本稿では、運輸部門と同部門への燃料供給を詳述した世界エネルギーシステムモデルを用いて、次世代自動車推進技術の大規模導入が、①CO₂排

出量, ②大気汚染物質排出量, ③エネルギー供給安定度に与える世界レベルの影響を 2050 年までの時間範囲で定量評価することを目的とする。さらに, モデル計算結果から, 次世代自動車推進技術の大規模導入がもたらす便益をより高め, 確かなものにするために必要な施策を導くことを試みる。

2. 研究手法

2.1. 世界エネルギーシステムモデル REDGEM70 の概要

REDGEM70 モデル (Takeshita and Yamaji, 2008; Takeshita, 2011, 2012) は, 一次エネルギー利用可能量の上限, 所与とする部門別・時点別のエネルギーサービス需要の満足, 新技術の市場浸透率の上限, 等の制約条件の下, 2010年-2100年 (1期=10年) とした対象期間中のエネルギーシステムコストの現在価値換算総和を最小化するような, 各種エネルギー, 及び, 各種技術の最適導入パターンを決定する動学的線形計画モデルである。また, 本モデルは, エネルギー需要の長期価格弾力性の関数として表わされる, エネルギー需要の削減に伴う消費者効用の損失をエネルギーシステムコストに含めることにより, エネルギー最終利用部門毎に, 価格誘導効果によるエネルギーサービス需要削減 (省エネルギー) 量を決定する。本モデルでは, 所与とする人口や所得といった社会・経済シナリオの将来推移は, IIASA-GGI (IIASA, 2007) の中庸コースである B2 シナリオに基づいて設定している。

REDGEM70 は, 世界全体を 70 地域に細分化しており, これら 70 地域の地域的特徴を詳細に考慮・表現した上で, 結果を世界 70 地域別に導出するという特徴がある。REDGEM70 の構造を図 1 に示す。このように, REDGEM70 は, バイオ燃料, 水素, DME, FT 合成燃料, 電力, 等将来有望な運輸用燃料, 及び, それらの製造技術を包括的に考慮している。さらに, REDGEM70 は, 一次エネルギー生産から最終エネルギー消費に至るエネルギー供給経路とエネルギーの最終利用を詳述していること, インフラストラクチャを明示的にモデル化することにより, エネルギー供給経路の各段階におけるコストを固定費と可変費に区別して考慮していること, 二次エネルギーの地域内送配コストや最終エネルギー小売コスト (例えば, 水素ステーションでの水素供給コスト) を, エネルギー最終利用部門毎の需要の散らばりの度合いに応じて, エネルギー最終利用部門毎に設定していること, 等の特徴を有している。これらの特徴により, REDGEM70 は運輸部門の分析に適したツールとなっている。

自動車部門は, 乗用車, 二輪車, バス, 小・中型トラック, 大型トラックの 5 モードに区別して考慮している。自動車用推進技術としては, 内燃エンジン車 (ICEVs), ハイブリッド車 (HEVs), プラグイン・ハイブリッド車 (PHEVs), 燃料電池ハイブリッド車 (FCHVs), 電気自動車 (EVs) を考慮している。自動車用燃料としては, 石油製品 (ガソリン, 軽油, LPG), エタノール, バイオデ

ディーゼル, FT 合成燃料, DME, 天然ガス (CNG), バイオガス, 水素 (圧縮気体水素), 電力を考慮しており, 原油や粗 FT 合成燃料の精製プロセスを詳述している。また, バイオ燃料と FT 合成燃料については, 任意の比率で化石燃料系の運輸用燃料 (ガソリン, 軽油, 天然ガス) と混合して利用することを選択肢として与えている。

ここで, 利用可能な推進技術と燃料の組合せ (以下「運輸技術」と呼称する) は, モード別に設定しており, 利用可能と想定した運輸技術毎に, 車両購入価格, 年間メンテナンスコスト, 実走行燃費, 大気汚染物質排出原単位, 等のパラメーターを設定している。そして, モード別, 地域別, 時点別に外生的に与えている, 人 km/年やトン km/年といった運輸アクティビティ需要 (エネルギーサービス需要) を満足する等の条件の下で, 運輸技術の最も費用効果的な導入パターンがモード別, 地域別, 時点別に決定される。

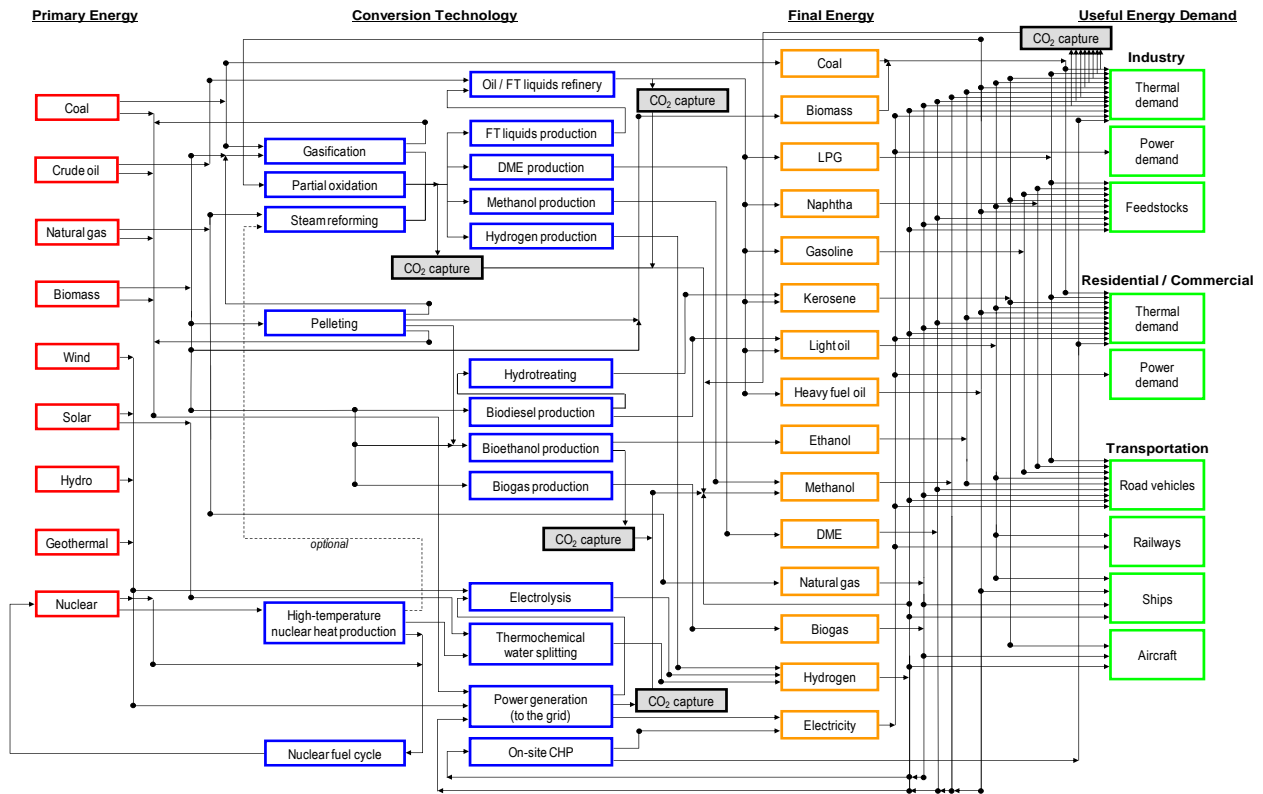


図1 世界エネルギーシステムモデル REDGEM70 の構造

注) FT=Fischer-Tropsch, DME=Dimethyl ether, CHP=combined heat and power.

所与とする運輸アクティビティ需要と, 内生的に決定されるモード別の各種運輸技術の導入パターンの関係, すなわち, 運輸アクティビティの需給バランス

スは式(1)により決定される。また、自動車部門からの大気汚染物質の排出量については、SO₂については式(2)、NO_xとPMについては式(3)により決定される。なお、式(1)–(3)で用いる定数及び変数の定義は表1に掲載している。

運輸部門のエネルギー所要量は、外生的に与えている運輸アクティビティ需要から省アクティビティ需要を減じたものと実運行エネルギー原単位（単位アクティビティあたりエネルギー所要量）の積により導出される。自動車部門については、実運行エネルギー原単位は、実走行燃費（台 km あたりエネルギー所要量）を稼働率（人／台またはトン／台）で除すことにより導出される。

$$Ract(m,i,t) - S(m,i,t) \leq \sum_s \sum_v LF(m,i,t) * ADT(m,i,t) * vin(m,s,t) * V(m,v,i,s) \quad (1)$$

$$Sem(m,i,t) = \sum_s \sum_v Sef(m,v,i,s) * FE(m,v,i,s) * ADT(m,i,t) * vin(m,s,t) * V(m,v,i,s) \quad (2)$$

$$NSem(m,p,i,t) = \sum_s \sum_v NSef(m,p,v,i,s) * ADT(m,i,t) * vin(m,s,t) * V(m,v,i,s) \quad (3)$$

表1 式(1)–(3)における定数及び変数の定義の一覧

名称	定義	種類
$Ract(m,i,t)$	モード <i>m</i> , 地域 <i>i</i> , 時点 <i>t</i> における自動車運輸アクティビティ需要（人km/年 or トンkm/年）	定数
$LF(m,i,t)$	モード <i>m</i> , 地域 <i>i</i> , 時点 <i>t</i> における稼働率（人/台 or トン/台）	定数
$ADT(m,i,t)$	モード <i>m</i> , 地域 <i>i</i> , 時点 <i>t</i> における年間走行距離（km/年）	定数
$vin(m,s,t)$	時点 <i>s</i> に製造された、モード <i>m</i> に属する運輸技術の時点 <i>t</i> における残存率	定数
$FE(m,v,i,s)$	時点 <i>s</i> に製造された運輸技術 <i>v</i> の、地域 <i>i</i> での実走行燃費（MJ/台km）	定数
$Sef(m,v,i,s)$	時点 <i>s</i> に製造された運輸技術 <i>v</i> のSO ₂ 排出原単位（g/MJ）	定数
$NSef(m,p,v,i,s)$	時点 <i>s</i> に製造された運輸技術 <i>v</i> の大気汚染物質 <i>p</i> の排出原単位（g/台km）	定数
$V(m,v,i,s)$	時点 <i>s</i> に製造された運輸技術 <i>v</i> の台数（台）	変数
$S(m,i,t)$	モード <i>m</i> , 地域 <i>i</i> , 時点 <i>t</i> における省運輸アクティビティ需要（人km/年 or トンkm/年）	変数
$Sem(m,i,t)$	モード <i>m</i> からの、地域 <i>i</i> , 時点 <i>t</i> におけるSO ₂ 排出量（g/年）	変数
$NSem(m,p,i,t)$	モード <i>m</i> からの、地域 <i>i</i> , 時点 <i>t</i> における大気汚染物質 <i>p</i> の排出量（g/年）	変数

2.2. 入力データと仮定

世界全体の運輸アクティビティ需要のモード別の将来予測値を図2に示す。予測手法の詳細については、Takeshita (2012)を参照されたい。本予測値は、活用した先行研究の性質上、まずは世界11地域別に算出されるが、次のステップとして、購買力平価換算国内総生産、現在のモード別運輸アクティビティ需要（入手可能ならばその予測値）、本モデルが依拠している将来の社会・経済シナリオ“B2シナリオ”のunderlying storylineである「地域的多様性は21世紀を通じてある程度保持される」を勘案することにより、この世界11地域別予測値をREDGEM70における48のエネルギー生産・消費地域に配分した。

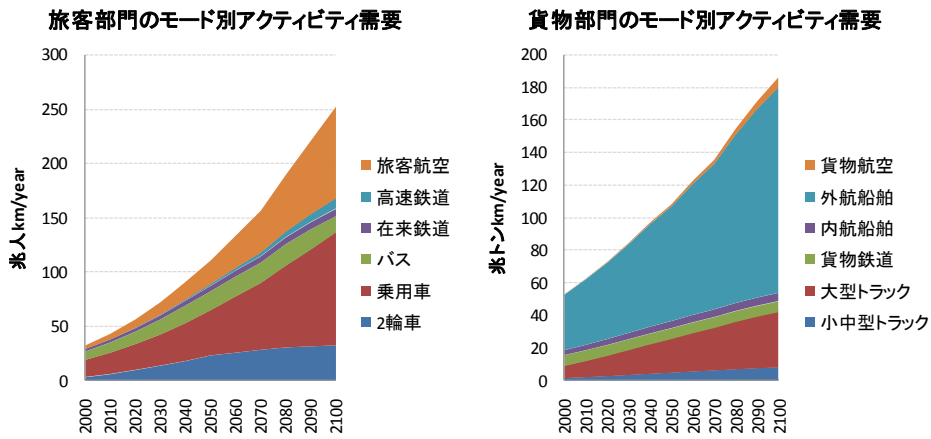


図2 旅客部門（左図）及び貨物部門（右図）のモード別運輸アクティビティ需要の予測値

REDGEM70 における、各モードで導入可能な運輸技術については、包括的な文献調査と専門家へのヒアリングを行うことにより特定した。乗用車、二輪車、バス、小・中型トラック、大型トラックの各モードにおいて導入可能と想定した運輸技術を表 2-4 に示す。

表 2 乗用車部門、バス部門、小・中型トラック部門において利用可能と想定した運輸技術

	ガソリン	軽油	LPG	ガソホール	エタノール	DME	CNG	圧縮気体水素	電力
内燃エンジン	+	+	+	+	+	+	+	+	
ハイブリッド	+	+	+	+	+	+	+	+	
プラグイン・ハイブリッド	+	+		+	+				+
燃料電池ハイブリッド	+					+		+	
バッテリー									+

注) 行に示した推進技術と列に示した運輸用燃料の導入可能な組合せを + 印で示している。

表 3 二輪車部門において利用可能と想定した運輸技術

	ガソリン	ガソホール	エタノール	電力
内燃エンジン	+	+	+	
バッテリー				+

注) 表 2 の脚注と同様。

表 4 大型トラック部門において利用可能と想定した運輸技術

	軽油	エタノール	DME	CNG
内燃エンジン	+	+	+	+

注) 表 2 の脚注と同様。

次に、運輸技術に対して設定したパラメーターの値について説明する。図 3 に、ガソリン内燃エンジン車の実走行燃費を 1 とした場合の、乗用車部門における

各種運輸技術の実走行燃費の比率の推定値と予測値を示す。また、図4に、乗用車部門における各種運輸技術の車両購入価格の推定値と予測値を示す。

図4に示すデータの設定においては、以下5点の重要な前提条件を置いている。第一に、プラグイン・ハイブリッド車については、走行の65%が電気走行と想定している（Grahn et al., 2009）。第二に、電気自動車以外の乗用車は燃料充填一回あたり走行距離は500 kmである一方、電気自動車の一充電あたり走行距離は200 kmと想定している。第三に、ハイブリッド車用、プラグイン・ハイブリッド車用、電気自動車用のLi-ionバッテリーのコストは、それぞれ、最終的にUS\$₂₀₀₀ 460/kWh, US\$₂₀₀₀ 420/kWh, US\$₂₀₀₀ 330/kWhまで低下すると想定している（IEA, 2009）。第四に、PEM燃料電池スタックのコストは最終的にUS\$₂₀₀₀ 95/kWまで低下すると想定している（Grahn et al., 2009）。第五に、燃料電池ハイブリッド車用高圧気体水素貯蔵タンク（700 bar）のコストは最終的にUS\$₂₀₀₀ 313/kg-H₂まで低下すると想定している（IEA, 2005; Grahn et al., 2009）。

500 kmの燃料充填一回あたり走行距離を持つ水素燃料電池ハイブリッド車と、200 kmの一充電あたり走行距離を持つ電気自動車の車両購入価格の将来値（究極的に到達し得る値）の相対関係については、詳細な文献調査の結果、たとえば後者の走行距離を短くしてバッテリーに要するコストを抑制するとしても、共通して、前者の方が後者より小さくなると予測されていることを重要なポイントとして指摘できる（Bandivadekar et al., 2008; Grahn et al., 2009; IEA, 2009）。

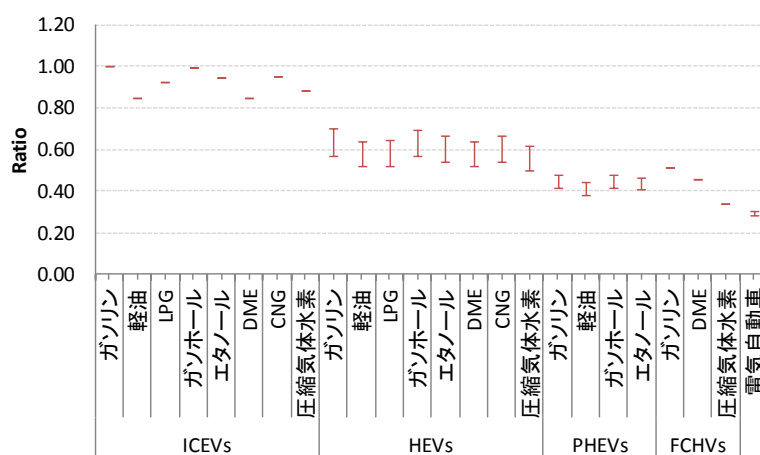


図3 乗用車部門における各種運輸技術の実走行燃費の比率

注) 幅は対象期間中の経年変化を示している。ICEVs=内燃エンジン車, HEVs=ハイブリッド車, PHEVs=プラグイン・ハイブリッド車, FCHVs=燃料電池ハイブリッド車。

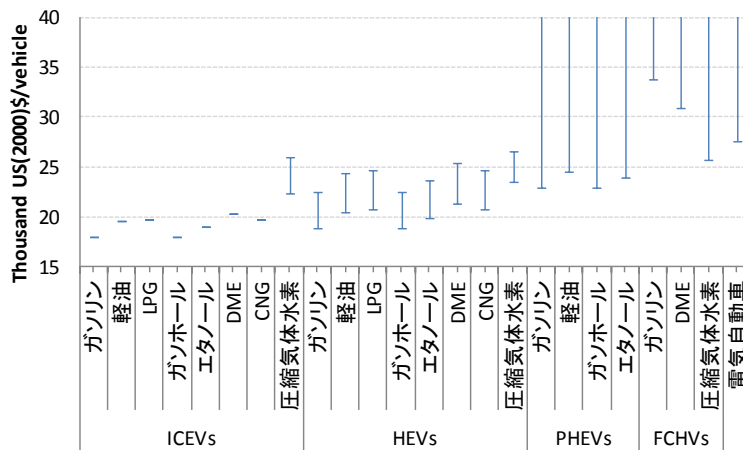


図4 乗用車部門における各種運輸技術の車両購入価格
注) 図3の脚注と同様。

図5に、ガソリンと軽油のSO₂排出原単位を、図6に、ガソリン内燃エンジン乗用車のNO_x・PM排出原単位を、世界地域別・時点別に示す。先進国における燃料中の硫黄含有率の経年変化については、EPA Tier 2, EURO 5・6, 大気汚染防止法等、同地域で施行済み・施行予定の関連規制を考慮して設定した。先進国におけるNO_x・PM排出原単位の経年変化についても、US Federal Emission Standards, Euro 5・6, ポスト新長期規制等、同地域で施行済み・施行予定の関連規制を考慮して設定した。その他の地域（移行経済国及び発展途上国）における排出原単位の経年変化については、一定のタイムラグを伴って先進国の値にキャッチアップすると想定して設定した。図7, 8には、ガソリン内燃エンジン車、または、ディーゼル内燃エンジン車のNO_x・PM排出原単位を1とした場合の、自動車部門における各種運輸技術のNO_x・PM排出原単位の比率を示す。

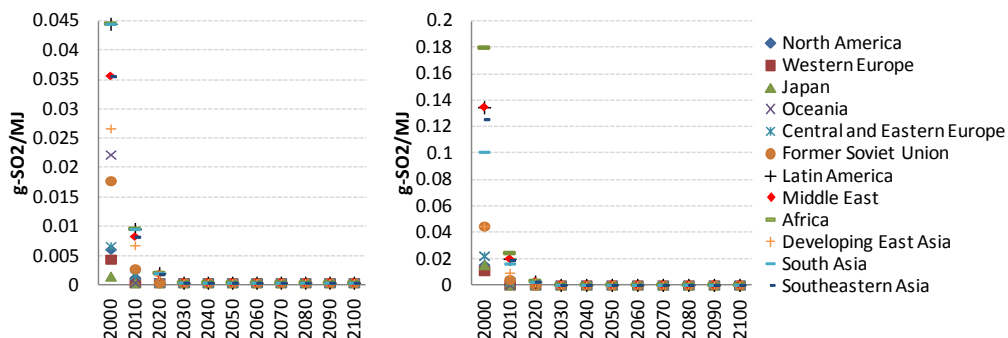


図5 ガソリン（左図）と軽油（右図）の世界地域別・時点別のSO₂排出原単位

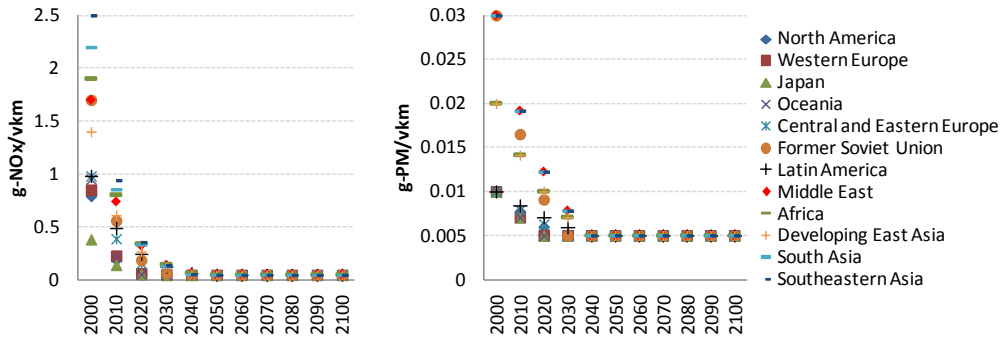


図 6 ガソリン内燃エンジン乗用車の世界地域別・時点別の NO_x・PM 排出原単位

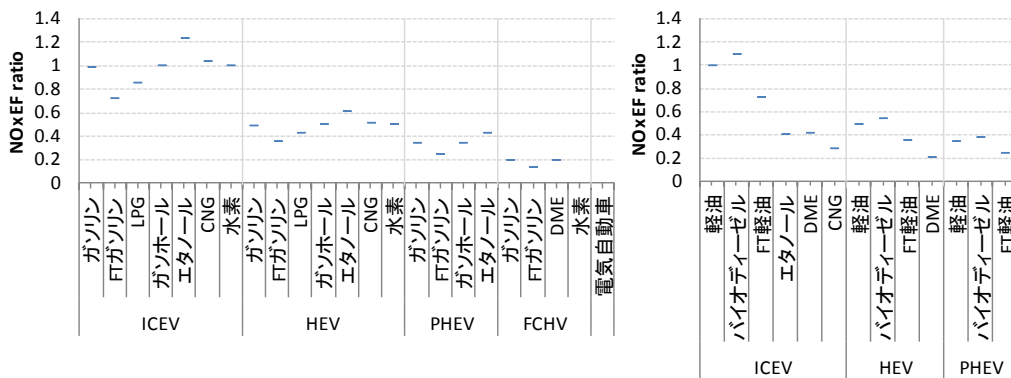


図 7 自動車部門における各種運輸技術の NO_x 排出原単位の比率

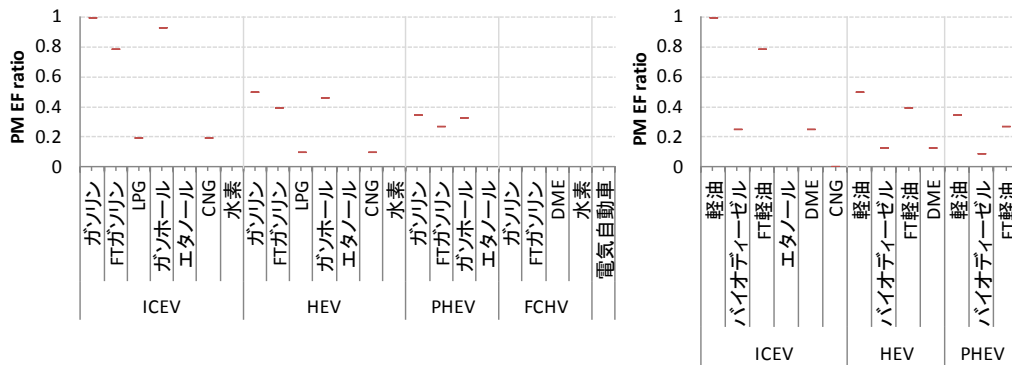


図 8 自動車部門における各種運輸技術の PM 排出原単位の比率

3. モデル計算結果と検討

3.1. モデル計算におけるケース設定

本研究では、次世代自動車推進技術の普及に関して以下の 2 つのケースを設定し、モデル計算を行った。

(1) BaU ケース

CO₂ 排出量や次世代自動車推進技術のシェアに関して何らの制約を課さない。2.1.章で既述したように、各種制約条件の下、対象期間中のエネルギーシステムコストの現在価値換算の総和が最小化されるような運輸技術の最適導入パターンがモード別、地域別、時点別にモデル内生的に決定される。

(2) Penetration ケース

CO₂ 排出量に関しては、BaU ケースと同様、制約を課さない。一方、次世代自動車推進技術のシェアに関しては制約を課す。すなわち、世界の乗用車部門、バス部門、小・中型トラック部門での各種自動車推進技術の「ストックベース」のシェアの推移は、“Energy Technology Perspectives 2012” (IEA, 2012a) で紹介されている“2°C 安定化シナリオ”における世界の乗用車部門での当該自動車推進技術の「販売ベース」のシェアの推移に等しいという、次世代自動車推進技術の普及に関して極端に楽観的な想定を置いている。

3.2. 乗用車部門における運輸技術の導入パターン

図9に、BaU ケースと Penetration ケースにおける、世界全体の乗用車ストックの車種別内訳の推移を示す。BaU ケースでは、CO₂ 排出量と次世代自動車推進技術のシェアに対して制約が課されていないため、2050 年にかけて、車両購入価格が安い内燃エンジン車とハイブリッド車しか選択されず、運輸用燃料としては安価なガソリンと軽油しか選択されない。同ケースでは、安価な化石燃料が大量消費される現状のエネルギー消費構造が維持されることにより、原油の入手可能量の減少とそれに伴う原油生産コストの上昇が起るため、燃料消費効率が高く（人 km あたりエネルギー消費量が小さく）、車両購入価格が相対的に安いハイブリッド車が経年的に大きなシェアを占めるようになる。

BaU ケースにおける、バス部門と小・中型トラック部門での運輸技術の導入パターンは、乗用車部門の結果とほぼ同様であり、大型トラック部門では、代替運輸技術の数が少ないこともあり、2050 年にかけて軽油内燃エンジン車しか導入されない。一方、同ケースでの二輪車部門における運輸技術の導入パターンについては、対象期間前半では、ガソリン内燃エンジン二輪車が大きなシェアを占め続けるが、電動二輪車の普及が進展し、対象期間後半では電動二輪車が世界の二輪車台数の半数以上を占めるようになる。これは、電動二輪車は、電気乗用車、電気バス、電気トラックと異なり、主要なコスト要素であるバッテリーの搭載必要量が少なく済むため、ガソリン内燃エンジン二輪車との価格差が小さいこと、電動二輪車は燃料消費効率が非常に高いこと、電気の価格がガソリンの価格より安いことが理由である。

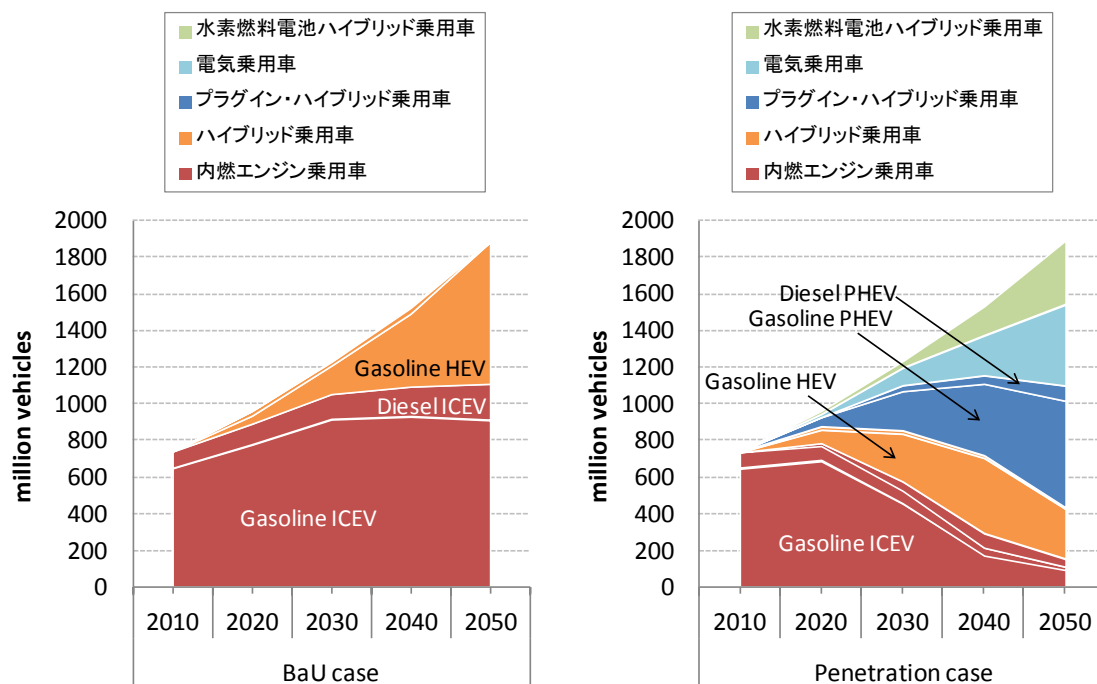


図9 2 ケースにおける世界全体の経年的な乗用車ストックの車種別内訳

Penetration ケースでは、3.1.章で既述した通り、次世代自動車推進技術のシェアに対して下限制約が課されており、世界全体の乗用車ストックの車種別内訳の推移に関する結果は、当該制約を反映したものとなり、次世代自動車推進技術が大規模普及するようになる。すなわち、プラグイン・ハイブリッド乗用車、電気乗用車、水素燃料電池ハイブリッド乗用車の普及が経年的に進展し、対象期間後半になると、これらの車種が世界の乗用車台数の半数以上を占めるようになる。同ケースでは、内燃エンジン乗用車は2020年をピークとして減少すること、ハイブリッド乗用車は単なる移行技術にとどまり、対象期間を通じて世界の乗用車台数の中で大きなシェアを占めることはないことも重要なポイントとして指摘することができる。

Penetration ケースにおける、バス部門と小・中型トラック部門での運輸技術の導入パターンは、これらの部門に占める次世代自動車推進技術のシェアに対しても乗用車部門の場合と同様の下限制約が課されているため、乗用車部門での結果とほぼ同様である。同ケースにおける、大型トラック部門と二輪車部門での運輸技術の導入パターンは、BaU ケースの結果とほぼ同様である。同ケースでは、CO₂ 排出量に対して制約は課されていないため、電力と水素以外の、tank-to-wheel ベースで CO₂ 排出原単位が小さい代替運輸用燃料は導入されない。つまり、内燃エンジン乗用車、ハイブリッド乗用車、プラグイン・ハイブリッド乗用車の燃料としては、ガソリンと軽油がほぼ全てを占める。

3.3. 次世代自動車推進技術の大規模普及が CO₂ 排出量に与える影響

BaU ケースと Penetration ケースにおいて導出された、世界全体の総 CO₂ 排出量を比較することによって、次世代自動車推進技術の大規模普及が CO₂ 排出量に与える影響について検討する。図 10 に、両ケースにおける世界全体の総 CO₂ 排出量の推移を示す。また、図 11 に、Penetration ケースにおける世界全体の総 CO₂ 排出量の推移の排出源別内訳を示す。

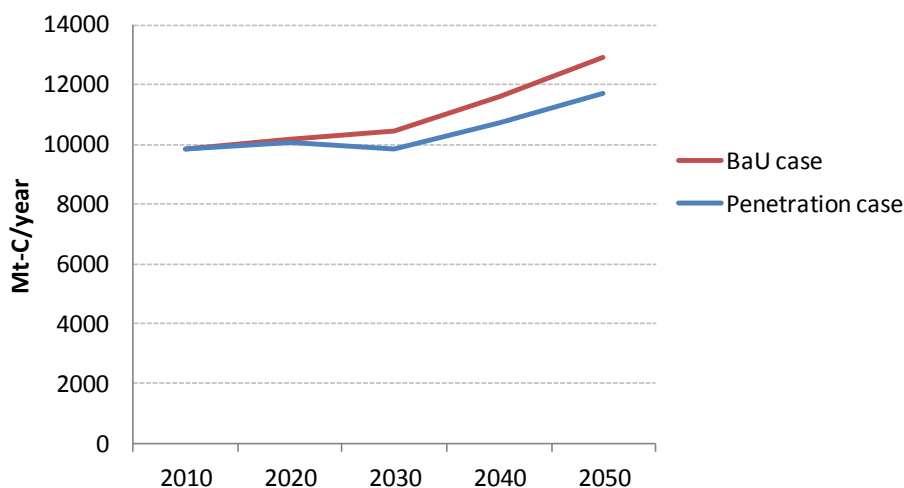


図 10 2 ケースにおける世界全体の総 CO₂ 排出量の推移

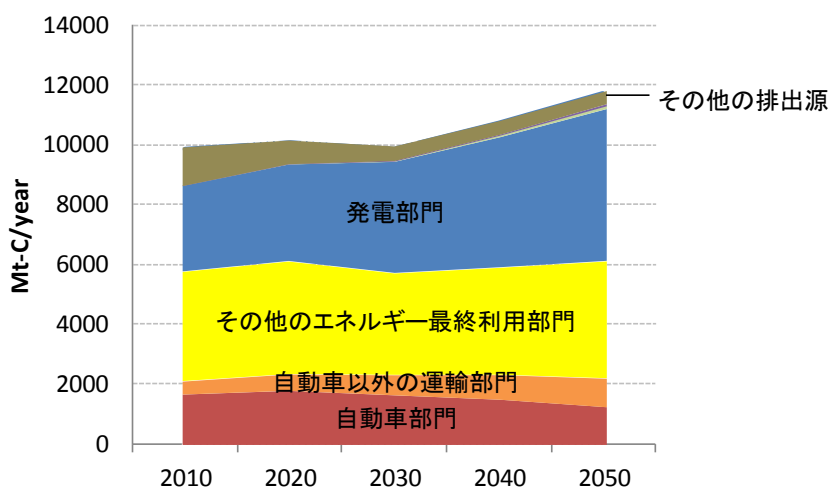


図 11 Penetration ケースにおける世界全体の総 CO₂ 排出量の推移の排出源別内訳

Penetration ケースにおける世界全体の総 CO₂ 排出量は、BaU ケースと比較して、2030 年では 5.7%、2050 年では 9.4%削減される。このように、図 9 に示したような次世代自動車推進技術の大規模普及を想定しても、Penetration ケースの

BaU ケースと比較した世界全体の総 CO₂ 排出量の削減幅は小さいことを重要なポイントとして指摘することができる。これには、2つの重要な理由がある。第一の重要な理由は、Penetration ケースでは、図 9 に示すように、自動車推進技術の電動化が急速に進展するものの、図 12 に示すように、世界の発電部門は主に石炭と天然ガスに依存する炭素集約的な構造であり続けるため、増加した電力需要を賄うことにより、世界の発電部門は BaU ケースと比較して、より多くの CO₂ を排出することである。第二の重要な理由は、ハイブリッド車やプラグイン・ハイブリッド車を含め、CO₂ を排出する自動車の数が増えること、及び、ハイブリッド自動車技術、プラグイン・ハイブリッド自動車技術、電気自動車技術、燃料電池自動車技術の適用が困難または非現実的な大型トラック部門が多くの CO₂ を排出することにより、Penetration ケースでも自動車部門は主要な CO₂ 排出源の一つであり続けることである。

これらの知見は、次世代自動車推進技術の大規模普及による CO₂ 排出削減効果を大きなものにするためには、次世代自動車推進技術の大規模普及に加えて、非化石燃料電源や CO₂ 回収・貯留（CCS）の導入等による世界の発電部門の低炭素化、及び、バイオ燃料等、CO₂ の排出がないまたは小さいクリーンな運輸用燃料の大規模導入が必要であることを意味している。

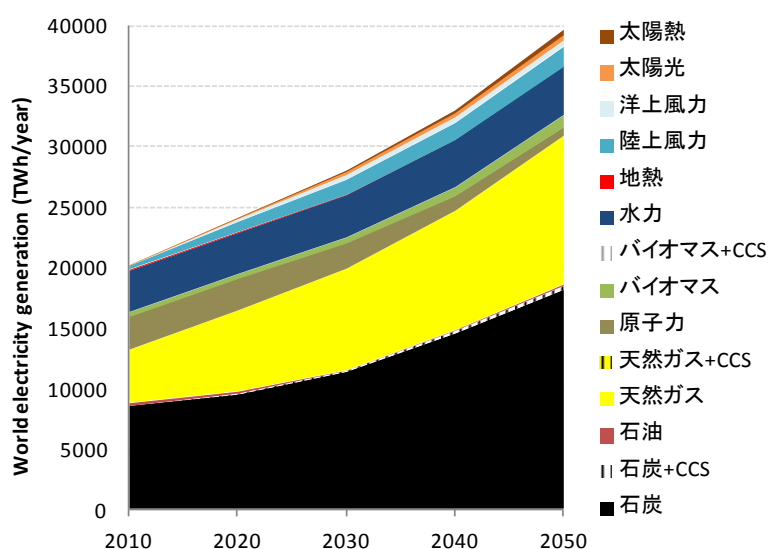


図 12 Penetration ケースにおける世界の総発電量の推移の電源別内訳

3.4. 次世代自動車推進技術の大規模普及が大気汚染物質の排出量に与える影響

次世代自動車推進技術の大規模普及が、世界全体の自動車起源の SO₂, NO_x, PM 排出量に与える影響について検討する。図 13-15 に、両ケースにおける世界全体の自動車起源の SO₂, NO_x, PM 排出量の推移を示す。

第一の重要な知見として、BaU ケースでも、世界の自動車起源の SO_2 、 NO_x 、PM 排出量は経年的に大幅に減少することを指摘することができる。これは、2.2. 章で既述したように、新車に対する大気汚染物質排出基準が経年的に大幅に強化されると想定しているためである。

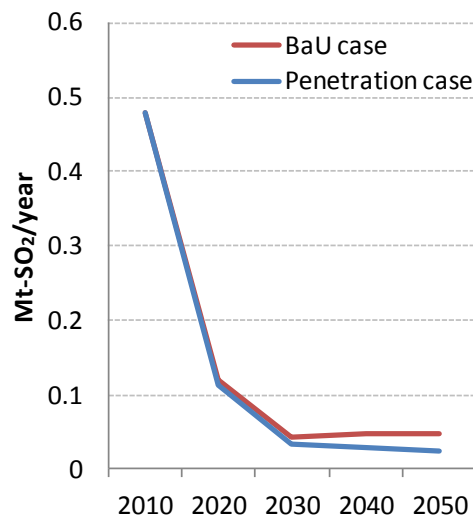


図 13 2 ケースにおける世界全体の自動車起源の SO_2 排出量の推移

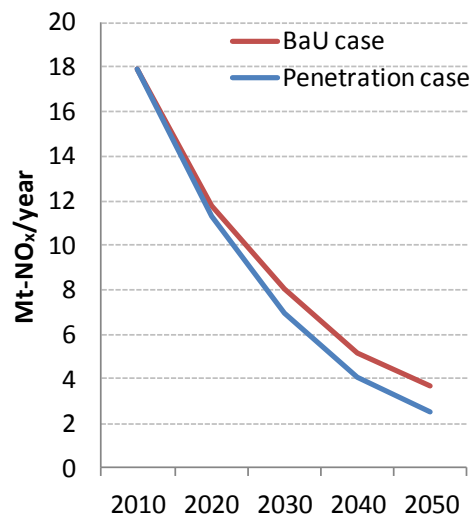


図 14 2 ケースにおける世界全体の自動車起源の NO_x 排出量の推移

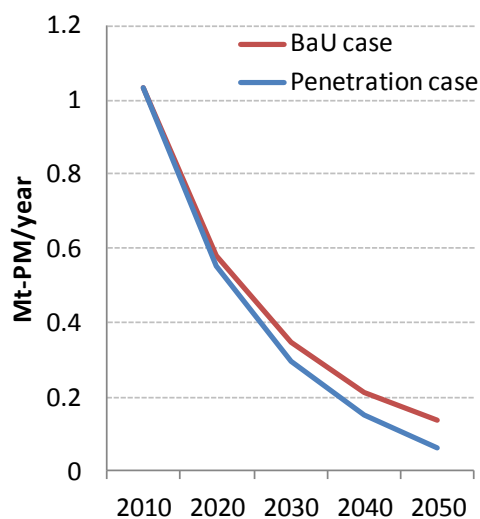


図 15 2 ケースにおける世界全体の自動車起源の PM 排出量の推移

第二の重要な知見として、Penetration ケースにおける世界の自動車起源の SO_2 , NO_x , PM 排出量は、これらの大気汚染物質の排出がないまたは極めて小さい次世代自動車推進技術の大規模普及により、BaU ケースと比較して、特に対象期間後半において大幅に削減されることを指摘することができる。Penetration ケースにおける世界全体の自動車起源の SO_2 , NO_x , PM 排出量の BaU ケースと比較した削減率は、2050 年では、それぞれ、48.5%, 31.9%, 53.0% である。

ただし、Penetration ケースでは、上述のように自動車推進技術の電動化の急速な進展により電力需要が増加すること、及び、世界の発電部門が炭素集約的な構造であり続けることから、世界の発電部門に対する大気汚染物質排出基準が BaU ケースと同様ならば、同部門からの大気汚染物質の排出量は BaU ケースと比較して増加する。つまり、Penetration ケースにおいて、厳しい大気汚染物質排出基準が発電部門に対しても課されないならば、世界の自動車起源の SO_2 , NO_x , PM 排出量の削減が、発電部門からのこれらの大気汚染物質の排出量の増加によって相殺される恐れがあることに注意が必要であることを指摘することができる。

3.5. 次世代自動車推進技術の大規模普及がエネルギー供給安定度に与える影響

次世代自動車推進技術の大規模普及が、世界全体のエネルギー供給安定度に与える影響について検討する。図 16 に両ケースにおける世界全体の一次エネルギー供給に占める輸入のシェアを、図 17 に両ケースにおける世界全体の Shannon-Wiener Diversity Index (SWDI) の値を、図 18 に両ケースにおける世界全体の一次エネルギー供給に占める石油のシェアを示す。SWDI (Stirling,

1998; Jansen et al., 2004) は、式(4)により定義される指標で、その値が大きいほど一次エネルギーが多様化している、換言すれば、エネルギー安定供給にとって好ましいことを意味する。

$$SWDI = - \sum_i (p_i * \ln(p_i)) \quad (4)$$

ここで、 p_i は総一次エネルギー供給に占める一次エネルギー i のシェアを示す。

図 16 から分かるように、意外なことに、Penetration ケースにおける世界の一次エネルギー供給に占める輸入のシェアは、2020 年–2040 年の間、BaU ケースの場合と比較して上昇する。これは、Penetration ケースでは、発電に用いられる化石燃料（主に天然ガス）の地域間貿易の増加が、自動車に用いられる石油の地域間貿易の減少を上回るためである。2050 年では、Penetration ケースにおける世界の一次エネルギー供給に占める輸入のシェアは、BaU ケースの場合より低下する。これは、Penetration ケースの 2050 年では、燃料消費効率が非常に高い電気自動車と水素燃料電池ハイブリッド自動車が世界の自動車台数の多くを占めるようになり、自動車に用いられる一次エネルギーの地域間貿易量が大きく減少するためである。

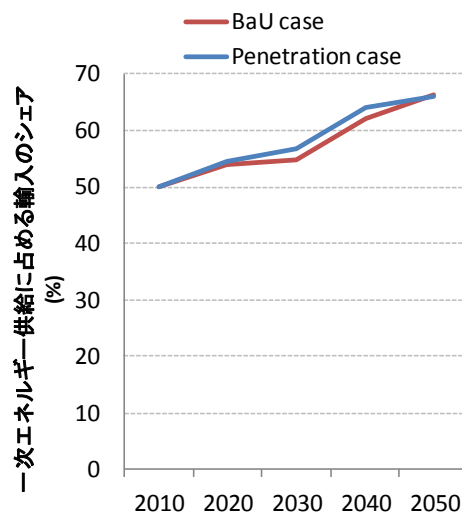


図 16 2 ケースにおける世界全体の経年的な一次エネルギー供給に占める輸入のシェア

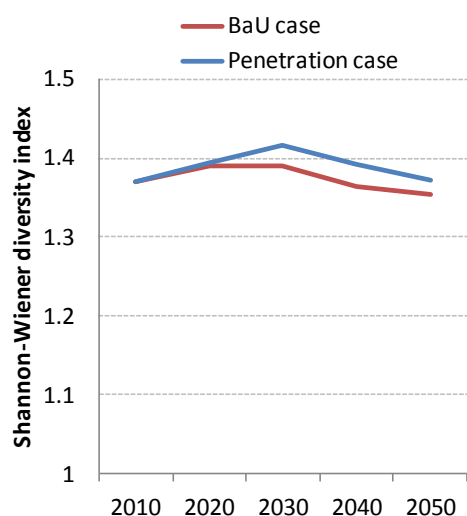


図 17 2 ケースにおける世界全体の経年的な Shannon-Wiener Diversity Index の値

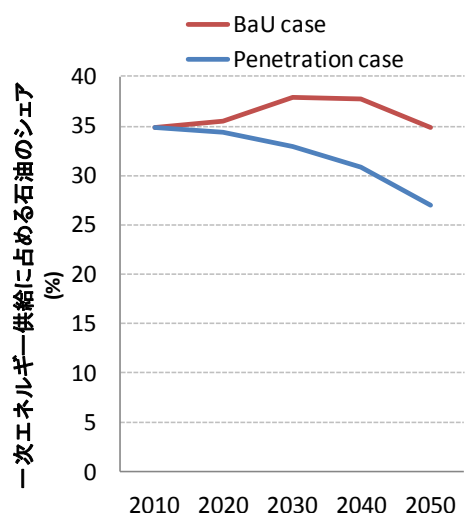


図 18 2 ケースにおける世界全体の経年的な一次エネルギー供給に占める石油のシェア

図 17 から分かるように、Penetration ケースにおける SWDI の値は、2020 年－2050 年の間、BaU ケースの場合と比較して大きくなる。これは、次世代自動車推進技術の大規模普及により、世界の一次エネルギー供給がより多様化し、エネルギー供給安定度が向上することを意味している。また、図 18 から分かるように、Penetration ケースにおける世界の一次エネルギー供給に占める石油のシェアは、BaU ケースの場合と比較して大きく低下する。Penetration ケースにおける世界の一次エネルギー供給に占める石油のシェアは、BaU ケースの場合と比較して、2030 年では 5.0%、2050 年では 7.8%低下する。

4. 結論

本研究から得られた、次世代自動車推進技術の大規模普及による世界レベルでの便益に関する主な知見と政策的含意は以下のように整理することができる。

第一に、自動車利用に起因する CO₂ 排出量を大幅に削減するためには、次世代自動車推進技術の大規模普及に加えて、世界の発電部門の低炭素化、及び、クリーンな運輸用燃料の大規模導入が必要である。

第二に、次世代自動車推進技術の大規模普及により、世界の自動車起源の SO₂, NO_x, PM の排出量は BaU ケースの場合と比較して大幅に削減される。しかし、世界の SO₂, NO_x, PM の総排出量の大幅削減を確かなものにするためには、発電部門に対しても厳しい大気汚染物質排出基準を課すことが不可欠である。

第三に、次世代自動車推進技術の大規模普及により、世界の一次エネルギー供給を多様化させること、世界の一次エネルギー供給に占める石油のシェアを低下させることが可能である。しかし、次世代自動車推進技術の大規模普及が世界の一次エネルギー供給に占める輸入のシェアに与える影響は、増加した電力需要がどのように賄われるか次第であり、負の影響を与える可能性も大いにあり得る。

政策的含意としては、次世代自動車推進技術の大規模普及による、気候変動の緩和、大気汚染の緩和、エネルギー供給安定度の向上という世界レベルでの便益を大きくし、確かなものにするためには、発電部門における低炭素化、厳しい大気汚染物質排出基準の設定等の適切な政策的措置を同時並行的に講じていくことが必要であることを指摘することができる。

参考文献

- A. Bandivadekar et al. (2008) *On the road in 2035: reducing transportation's petroleum consumption and GHG emissions*. Report No. LFEE 2008-05 RP, Laboratory for Energy and the Environment, MIT, Cambridge, MA.
- A. Boey and B. Su (2014) Low-carbon transport sectoral development and policy in Hong Kong and Singapore. *Energy Procedia*, Vol. 61, pp. 313-317.
- BP (2014) *BP energy outlook 2035*. BP, London.
- J. Cofala et al. (2007) Scenarios of global anthropogenic emissions of air pollutants and methane until 2030. *Atmospheric Environment*, Vol. 41, pp. 8486-8499.
- M. Grahn et al. (2009) Fuel and vehicle technology choices for passenger vehicles in achieving stringent CO₂ targets: connections between transportation and other energy sectors. *Environmental Science & Technology*, Vol. 43, pp. 3365-3371.
- J. C. Jansen et al. (2004) *Designing indicators of long-term energy supply security*. ECN-C-007, Energy Research Center of the Netherlands, Pettern, The Netherlands.

- IEA (2005) *Prospects for hydrogen and fuel cells*. IEA, Paris.
- IEA (2009) *Transport, energy and CO₂: moving toward sustainability*. IEA, Paris.
- IEA (2012a) *Energy technology perspectives 2012*. IEA, Paris.
- IEA (2012b) *World energy outlook 2012*. IEA, Paris.
- IEA (2013) *World energy outlook 2013*. IEA, Paris.
- IIASA (2007) *GGI scenario database*. <<http://www.iiasa.ac.at/Research/GGI/DB/>>
- D. Ives et al. (2013) Infrastructure investments in the Middle East & North Africa. *UFRGS Model United Nations Journal*, pp. 308-362.
- A. Stirling (1998) *On the economics and analysis of diversity*. Paper No. 28, University of Sussex, Sussex, UK.
- T. Takeshita (2011) Global scenarios of air pollutant emissions from road transport through to 2050. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, Vol. 8, pp. 3032-3062.
- T. Takeshita (2012) Assessing the co-benefits of CO₂ mitigation on air pollutants emissions from road vehicles. *Applied Energy*, Vol. 97, pp. 225-237.
- T. Takeshita and K. Yamaji (2008) Important roles of Fischer-Tropsch synfuels in the global energy future. *Energy Policy*, Vol. 36, pp. 2791-2802.