

研究論文

補助金効果と学習効果を考慮した 新エネルギー技術の導入分析

Analysis of Clean Energy Technologies Using both Subsidy Effect and Learning Effect

島崎 洋一*・北嶋 敏憲**
Yoichi Shimazaki Toshinori Kitajima

(原稿受付日2006年6月23日, 受理日2006年12月18日)

Abstract

The aim of this study was to analyze the introduction of clean energy technologies in Japan using both subsidy effect and learning effect. The authors used the MARKAL based on linear programming technique. The model was benchmarked against 1990 base year statistics and the projections cover five-year time intervals extending from 1995 to 2050. At first, accumulated production in the period was calculated along with the introduction incentive by the subsidy. Then, the unit price was re-setting based on learning curve. We analyzed sensitivity for five scenarios of progress-ratio from 70% to 90%. Finally, optimization production was re-calculated. The simulation results suggested that the introduction of the fuel cell vehicle has changed compared with the introduction of the clean energy power generation. It was found that a goal for the progress rate was less than 85% for clean energy technologies introduction. For example, it is necessary to reduce for fuel cell vehicle unit price by 5,000,000 yen in 2030 and 2,500,000 yen in 2040.

1. 研究目的

2006年5月, 新・国家エネルギー戦略¹⁾が公表され, 我が国では, 国民に信頼されるエネルギー安全保障の確立に向けて, 世界最先端のエネルギー需給構造の実現が明示された。この戦略を実現するためには, 明確な数値目標の設定が重要であり, 新エネルギー技術が市場に普及する条件を定量的に評価しておくことが望ましい。新エネルギー技術は既存技術に比べて, コストが割高となるため, 普及の初期段階において補助金政策を実施し, 導入インセンティブを与え, その後, 普及するか否かは, 累積生産量によりコストが減少する学習効果が鍵となる。

そこで, 本研究では, 補助金効果と学習効果の2つのメカニズムを考慮したMARKALモデルを開発し, 我が国における長期的なエネルギー需給システムの推移を分析する。学習曲線を新エネルギー技術に適用する際, 累積生産量に伴うコスト低減の指標である進歩率に着目した。進歩率の感度分析から, 新エネルギー技術の導入量を把握し, 各技術が普及するためのコスト低減の目標値を定量的に示すことを目的とする。

植屋ら²⁾は, 学習曲線を用いて, 燃料電池のコスト低下

を分析している。ただし, 燃料電池単体のコスト構成とその量産化に着目しているため, 他のエネルギー技術との競合や補助金効果には触れていない。一戸ら³⁾は, 二酸化炭素排出削減の観点から, MARKALモデルを用いて, 我が国の乗用車部門における車種構成を分析している。二酸化炭素排出量の制約の有無から補助金を算出し, 炭素税との関係を比較している。このモデルでは, 外生的に補助金がハイブリッド自動車のみ還元される構造になっており, 学習効果の進歩率に関する詳細な分析は行われていない。

従来, 動学的最適化モデル⁴⁻⁷⁾において, 新エネルギー技術の学習効果を内生化するために, 混合整数計画法による解法が提案され, 非常に興味深い結果が得られている。しかしながら, 非線形モデルとなるため, 完全な最適解である保証がない上, 学習曲線の適用期間が50年程度と長く, その根拠が不十分であることや技術の過大評価につながるものが指摘されている。本解析では, 各技術の補助金の対象期間を15年に限定し, 線形の動学的最適化モデルを用いて, 各技術の累積生産量を定量化する。次に, モデルの外部で学習曲線を適用し, 技術の新たな単価を求める。その値をモデルに入力し, 再度, 最適化計算を行う。すなわち, 学習曲線の非線形要素を外生的に扱い, 最適化計算を線形モデルで処理することを試みた。

*山梨大学大学院医学工学総合研究部社会システム工学系准教授
〒400-8511 山梨県甲府市武田4-3-11

** (株)フォーカスシステムズ

〒141-1122 東京都品川区東五反田2-7-3

第20回および第21回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンスの内容をもとに作成したもので, 第24回および第25回研究発表会にて発表

2. モデリング

2.1 エネルギー需給モデルMARKAL

MARKAL (Market-Allocation) は、1980年代初頭に開発され、国際エネルギー機関の国際協力プロジェクトであるETSAP (Energy Technology Systems Analysis Programme)⁸⁾を中心に改良が行われている。分析対象は、国あるいは地域におけるエネルギー需給システムである。本解析では、(独)日本原子力研究開発機構がデータベース化を施した日本版MARKALのソースプログラム^{9)、10)}を使用した。図1にエネルギー需給システムの概要を示す。システムは、1次エネルギー源から2次エネルギー、最終エネルギー需要までをネットワーク構造の形で表現し、将来シナリオに基づき、産業部門、民生部門および運輸部門のエネルギー需要を設定する。本モデルは、線形計画法を用いて、システムコスト最小化の観点から、エネルギー需給システムの構造とエネルギー技術の利用規模が最適決定されるボトムアップ型である。(1)式に目的関数を示す。これは、設備費、維持費、燃料費および補助金・税金をそれぞれ割引率3%により補正した日本全体のエネルギーシステムコストの総和である。また、炭素税の補助金効果を分析するために、制約条件に(2)式を追加した¹¹⁾。対象期間は1990年から2050年を5年刻みに13期とした。

$$Z = [\sum_{l,m} x_{l,m} pc_{l,m} + \sum_{i,j} x_{i,j} mc_{i,j} + \sum_{i,f} x_{i,f} fc_{i,f} + (1-\theta) \times \sum_{i,k} x_{i,k} pc_{i,k} + \pi \times \sum_{i \in fossil} x_{i,i} co_{i,i}] + (1+d)^{-t} \rightarrow Min. \dots (1)$$

$$\theta_i \times \sum_k x_{i,k} pc_{i,k} \leq \pi \times \sum_{i \in fossil} x_{i,i} co_{i,i} \dots (2)$$

x: 活動量, pc: 設備単価, mc: 維持単価, fc: 燃料単価,
co: 炭素排出係数, d: 割引率, θ: 補助率, π: 炭素税率,
f: 燃料種別, i: 化石燃料種別, j: 全技術, k: 補助金対象である技術,
m: 補助金対象でない技術, t: 期間

2.2 補助金効果と学習効果

補助金の対象技術は、発電部門の太陽光発電と定置用燃料電池および運輸部門のハイブリッド自動車、電気自動車と燃料電池自動車とした太陽光発電は住宅用と産業用の2種類、定置用燃料電池はリン酸形、熔融炭酸塩形、固体高分子形の3種類をそれぞれ設定した。燃料電池自動車は、水素直接搭載型を対象とした。補助金の上限は、発電技術が設備単価の3分の1、自動車が既存車の価格差2分の1とした。表1に技術の補助対象期間を示す。

学習効果^{2)、12)}とは、累積した知識や経験によって製造コストが低下する過程を表現したものである。(3)式に学習曲線を示す。学習曲線は、「累積生産量が倍増するたびに、一定の比率で単位コストが減少する」と定義されている。学習効果を表す指標として、進歩率 (PR: Progress-Ratio) が用いられる。進歩率とは、累積生産量が2倍になった場合のコスト低下の割合を示しており、(4)式で表される。

$$pc = pc_0 \times \left(\frac{x}{x_0}\right)^{\beta} \dots (3)$$

$$PR = 2^{-\beta} \dots (4)$$

pc: 設備単価, x: 累積生産量, PR: 進歩率, 0: 初期 (基準)

一般的に進歩率は、資本集約的産業では小さく、労働集約的産業では大きいことが知られており、半導体産業では70%から85%、機械組立産業では85%から95%とされている。

表2に本分析で設定した新エネルギー技術の初期単価、初期累積生産量および耐用年数の値¹³⁾を示す。産業用や住宅用の太陽光発電の学習効果を算出する際、技術の相乗効果を仮定し、2種類の累積生産量を合算した後、それぞれの設備単価を求めた。同様に、3種類の燃料電池およびハイブリッド自動車と電気自動車も相乗効果を適用した。

本解析では、2005年以降に2,400円/tCの炭素税¹⁴⁾が導入され、得られた税収から新エネルギー技術に補助金を与え

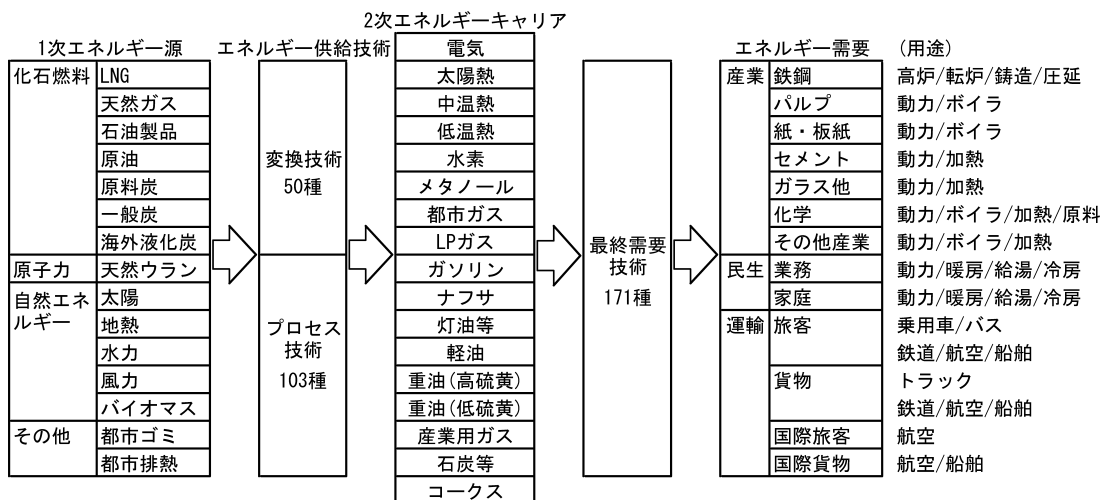


図1 日本版MARKALのエネルギー需給システムの概要

ると仮定している。この基準となるシナリオの結果を参照し、新エネルギー技術の進歩率の感度分析を70%から5%刻みで90%までの5段階に設定した。

図2にハイブリッド自動車の導入を例に補助金効果と学習効果の適用方法を示す。本解法では、(a)(b)(c)の3段階があり、(a)と(c)がMARKALの線形計画法による動学的最適化計算、(b)が学習曲線の非線形要素をMARKALの外部で補っていることを意味している。

ステップ1 (a) MARKALの学習曲線適用前の最適化計算

MARKALでは、あらかじめ車両価格等のパラメータを計算年ごとに設定する。本解析では炭素税が導入され、その税収から、(a)のようにハイブリッド自動車に対し、表1の補助対象期間のおおりに2005年から2019年までの3期間、既存車との価格差2分の1を上限に補助金が与えられる。

ステップ2 (b) 学習曲線による車両価格の変更

次に、(b)のように1度目の最適化計算の結果から得られたハイブリッド自動車の累積生産量をハイブリッド自動車の学習曲線にあてはめ、外生的に2005年から2050年までの車両価格を再設定する。

ステップ3 (c) MARKALの学習曲線適用後の最適化計算

最後に、再設定した値に基づき、2度目の最適化計算を行う。この例は、進歩率が80%の場合であり、(a)と比べて、学習効果による累積生産量の増大が確認できる。

図3に設備単価の初期値、図4に進歩率の設定による設備単価の変化をそれぞれ示す。ただし、設備単価を再設定する際、既存の技術より安くないように制約を加えている。また、各技術の単価の再設定は、1回目の最適化計算により求められた各技術の累積生産量に依存するため、進歩率が停滞する場合、初期の単価より高くなる可能性がある。なお、全ケースにおいて原油の輸入燃料価格は、長期的に上昇し続け、2050年には2000年の2倍になるシナリオを与え、原子力発電の設備容量は、2005年以降、現状を

表1 新エネルギー技術の補助対象期間

年	05	10	15	20	25	30	35	40
太陽光発電	○	○	○					
定置用燃料電池			○	○	○			
ハイブリッド自動車	○	○	○					
電気自動車	○	○	○					
燃料電池自動車						○	○	○

注：表の数字は2000年以降の下2桁、○は補助対象期間を示す。

表2 新エネルギー技術の学習曲線の初期値

技術	初期単価 [円/kW]	初期累積 生産量[kW]	耐用年数 [年]
産業用太陽光発電	740,000	330,000	30
住宅用太陽光発電	850,000		20
リン酸形燃料電池	2,400,000	12,800	20
熔融炭酸塩形燃料電池	3,000,000		20
固体高分子形燃料電池	1,600,000	2,000,000	15
ハイブリッド自動車	17,000		10
電気自動車	42,500	2,000	10
燃料電池自動車	480,000		10

維持するシナリオを設定している¹⁵⁾。最終エネルギー需要量の設定は、2005年以降、15EJ程度でほぼ一定とした。この設定の前提条件となる経済成長率は、1990年から2005年までは平均値の1.2%、その後、減少を続け、2030年以降は0%になると仮定した。

3. 最適化計算

3.1 学習曲線の適用前の結果

図5に学習曲線を適用する前の基準シナリオ、炭素税2,400円/tCのみを課した場合の計算結果を示す。炭素排出量は、1990年の324MtCから増加傾向にあるが、2010年以降減少し、2050年には313MtCとなる。また、1次エネルギー消費量の

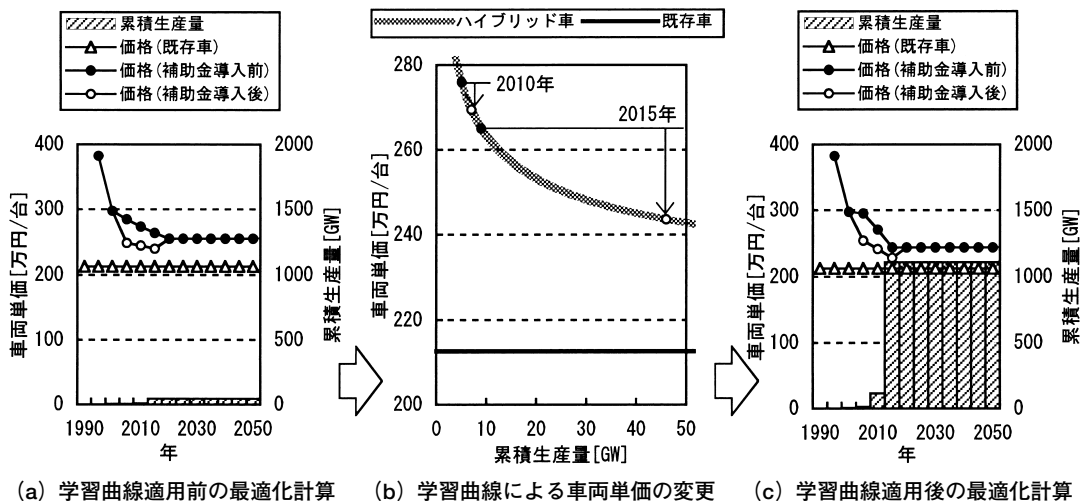


図2 ハイブリッド自動車に対する補助金効果および学習曲線の適用例

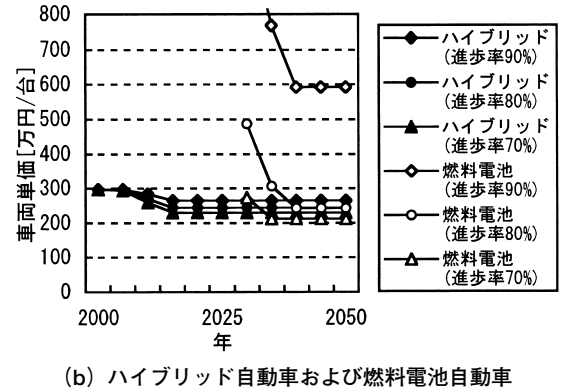
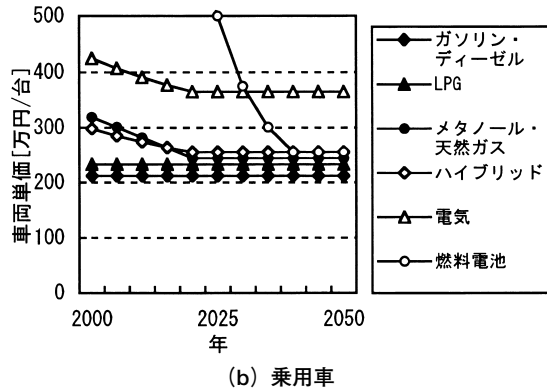
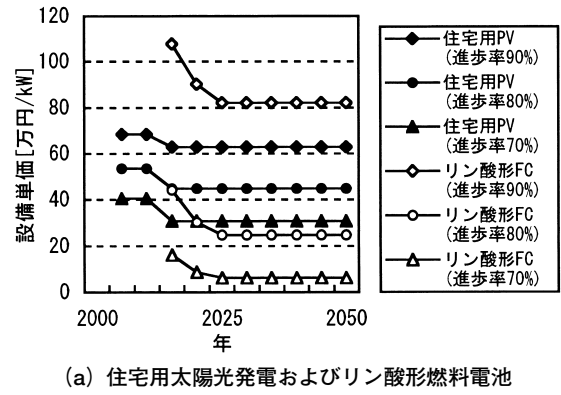
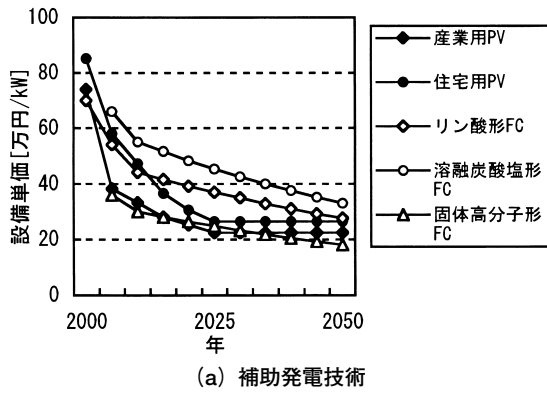


図3 設備単価と車両単価の初期設定

図4 進歩率の設定による設備単価と車両単価の変化

推移は、1990年の石油依存度が57%であるのに対し、2050年には31%に減少する。石油の代替として、石炭と天然ガスの割合が増加する。石油から石炭への代替は、電力供給技術の設備容量に顕著に表れている。天然ガス火力発電の設備容量は、1次エネルギー消費量の微増に反し、減少している。これは、天然ガスを改質装置により水素へ変換し、燃料電池の駆動に利用することに起因する。水力、地熱、新エネルギーを含めた再生可能エネルギーによる発電は、2000年以降、新エネルギーを中心に増加する結果となっている。図5(d)の補助金対象である発電技術の設備容量の推移から明らかとなっており、定置用燃料電池の導入が大きな役割を果たす。図5の(e),(f),(g)は、乗用車、バスおよびトラックの各部門における燃料種別の普及台数の推移を示したものである。乗用車では、ガソリン自動車が大半を占めるが、2015年にハイブリッド自動車が100万台弱、2040年に水素を駆動源とする燃料電池自動車が400万台程度の導入がみられる。特に、燃料電池自動車は、バス部門において普及が促進することがわかる。トラック部門では、ディーゼル自動車が大半を占める結果となった。

3.2 学習曲線の適用後の結果

図6に学習曲線を適用した後の最適化計算の結果を示す。2050年の炭素排出量は、進歩率70%が275MtC、進歩率90%が315MtCとなる。図5(a)との比較から、進歩率80%が確保できれば、基準シナリオに比べて、炭素排出量は減少する。1次エネルギー消費量の推移は、進歩率が向上するに

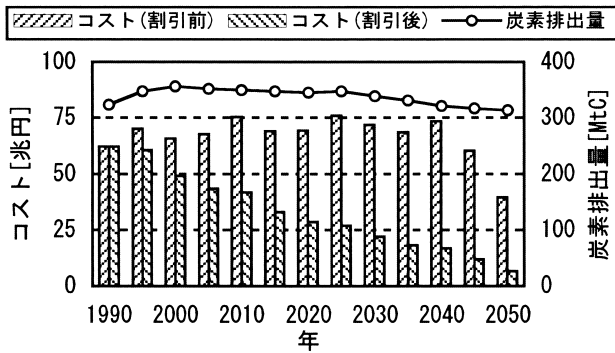
したがって、天然ガスの消費量が增大する傾向となり、その結果、石油依存率が最大20%まで低下する。

図7は進歩率の変化による感度分析の計算結果である。補助金対象の発電技術と自動車の車種構成の2つに分類している。なお、車種構成の設備容量は、乗用車、バスおよびトラックの出力をそれぞれ50kW/台、150kW/台、100kW/台に換算している。

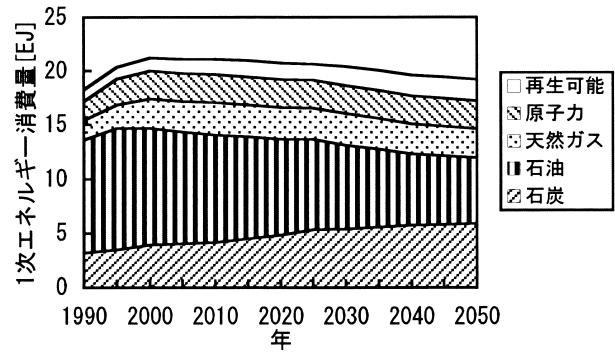
ここでは、進歩率80%を基準に考察を行う。進歩率が80%の場合、太陽光発電は1GW程度の導入に留まるが、3種類の定置用燃料電池は補助金終了の2030年以降、それぞれ10GW以上ずつ導入される。車種構成の方は、ハイブリッド自動車が補助金効果により2005年以降に導入されるが、その後、縮小する結果となった。燃料電池自動車は2045年以降の補助金終了後も拡大傾向にあることがわかる。

次に、進歩率が70%に向上する場合、住宅用太陽光発電は2015年以降に5GW以上が導入されるが、その後、定置用燃料電池の導入の方が促進される。進歩率80%の場合に比べて、固体高分子形燃料電池のみ導入が増大する。したがって、定置用燃料電池は、進歩率80%が確保できれば、リン酸形燃料電池を中心に導入が期待できる。車種構成は、ハイブリッド自動車と燃料電池自動車の代替が進む。特に、ハイブリッド自動車は進歩率が75%から70%へなることにより、乗用車部門のガソリン自動車を代替する。燃料電池自動車は進歩率75%の目標で十分に導入が進む。

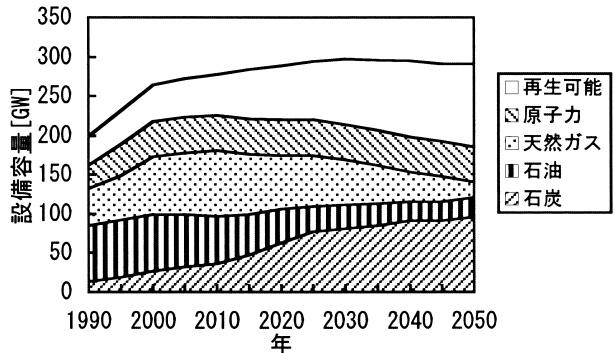
一方、進歩率が90%に留まる場合、住宅用太陽光発電の



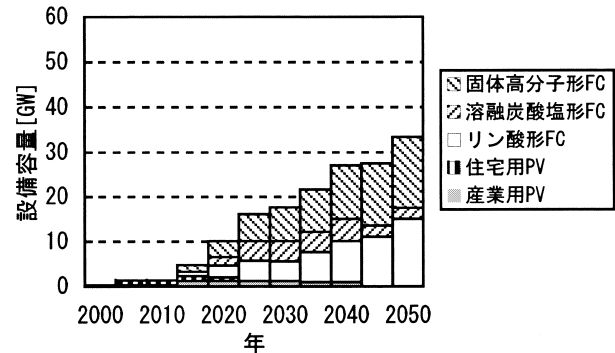
(a) システムコストと炭素排出量の推移



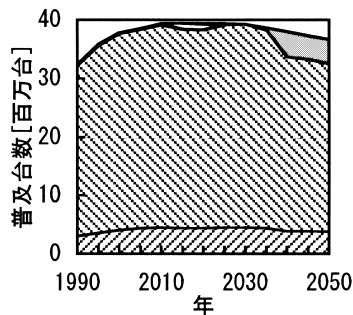
(b) 1次エネルギー消費量の推移



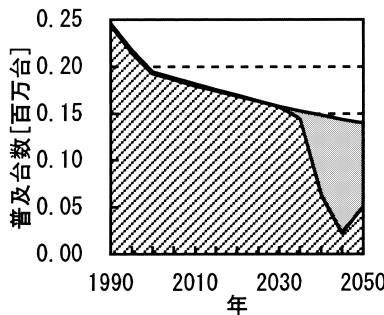
(c) 電力供給技術の設備容量の推移



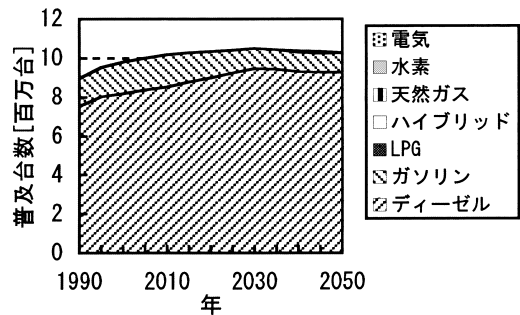
(d) 補助発電技術の設備容量の推移



(e) 乗用車の普及台数の推移

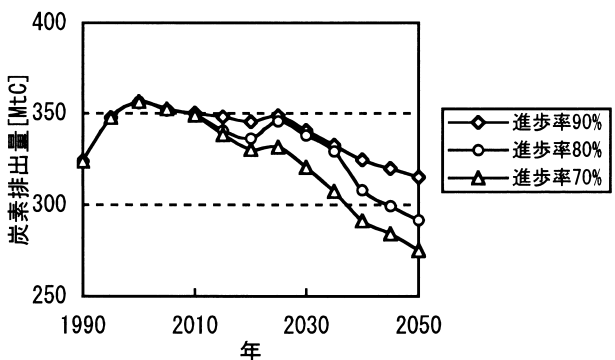


(f) バスの普及台数の推移

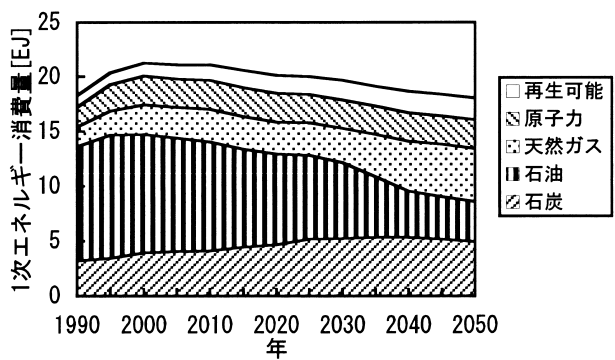


(g) トラックの普及台数の推移

図5 学習曲線適用前の最適化計算の結果



(a) 進歩率の変化による炭素排出量の推移

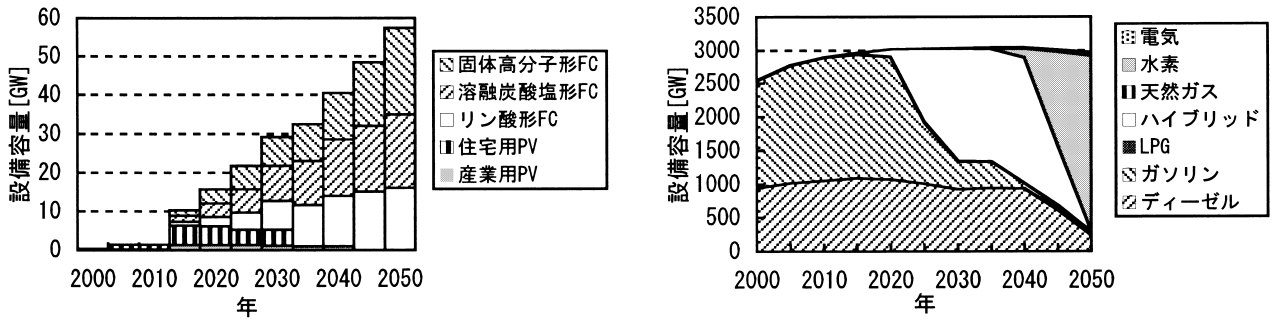


(b) 1次エネルギー消費量の推移 (進歩率70%)

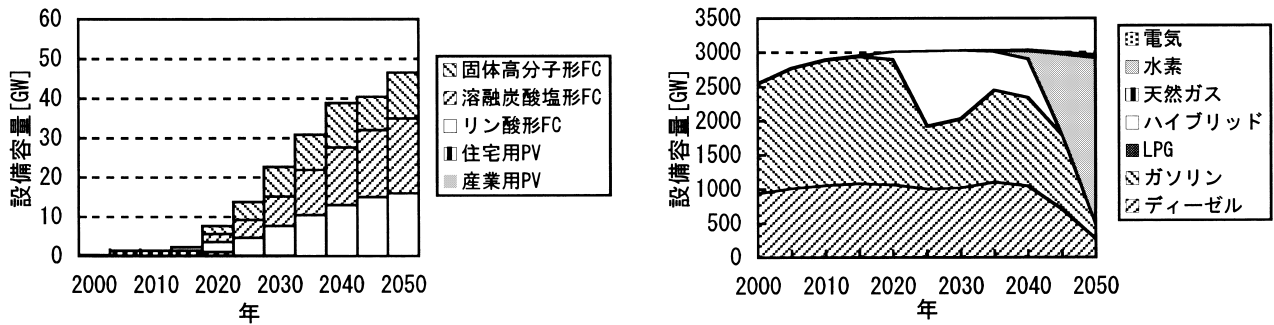
図6 学習曲線適用後の最適化計算の結果

導入は変化しないが、定置用燃料電池の導入が抑えられる。同様に、車種構成においても燃料電池自動車の導入が進まないことがわかる。ただし、炭素税の二酸化炭素排出の抑制効果もあり、2040年以降、乗用車部門で天然ガス自動車の導入がみられた。ハイブリッド自動車は、進歩率85%の

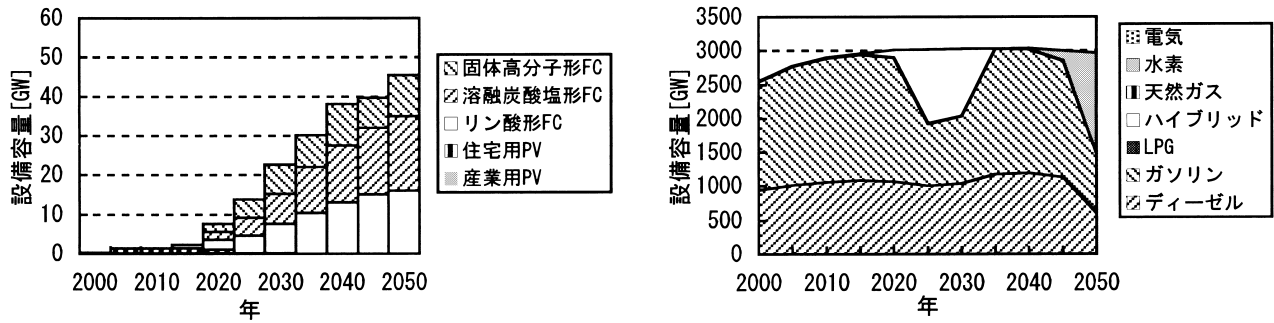
場合、導入がみられるが、進歩率が90%になると、ほとんど導入されない。1980年以降の太陽光発電の進歩率が82%^{(2), (12)}であったことも含め、今後、新エネルギー技術の普及を推進するためには、少なくとも進歩率80%から85%までのコスト低下がひとつの目安といえる。



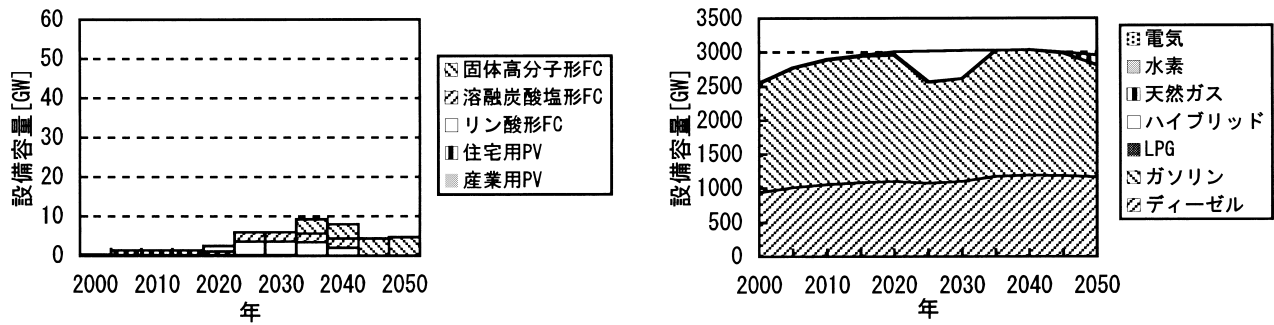
(a) 進歩率70%



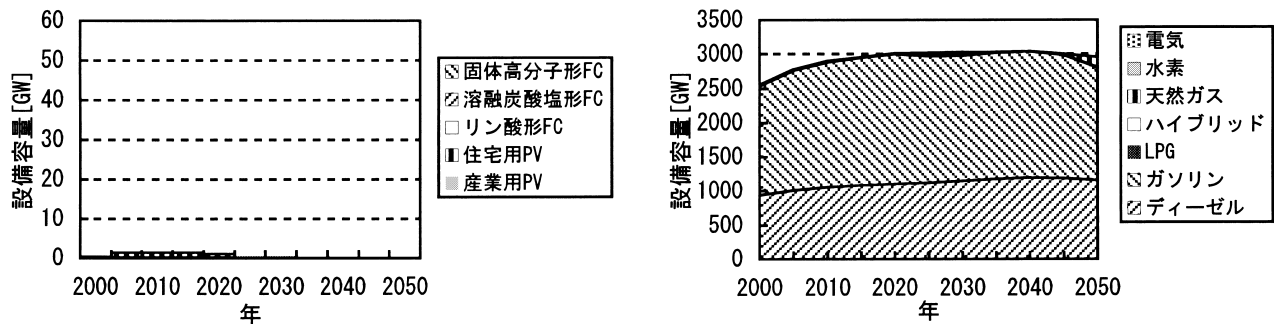
(b) 進歩率75%



(c) 進歩率80%



(d) 進歩率85%



(e) 進歩率90%

図7 進歩率の変化による補助発電技術と車種構成の推移

4. 結論

本研究では、補助金の導入インセンティブと学習曲線のコスト低減効果に着目し、新エネルギー技術の進歩率に関する感度分析を行った。その結果、以下の知見が得られた。

最も進歩率の影響を受けるのは、燃料電池自動車である。燃料電池自動車は、進歩率が80%を確保できないと導入が進まない。普及を図るためには、2030年に500万円/台を目標とし、2040年に250万円/台以下のコスト低減が必要となる。今後、燃料電池自動車のコスト低減が期待できない場合は、代替案として、天然ガス自動車の導入促進を図ることが有効である。ハイブリッド自動車は、進歩率が85%でも導入がみられる。現在、ハイブリッド自動車は、既存車の1.4倍の単価であるが、2020年の時点において、既存車(212.6万円/台)の1.2倍以下、250万円/台に抑えられれば、今後も普及すると考えられる。

太陽光発電は、初期累積生産量が多いことも起因し、定置用燃料電池に比べ、導入量に大きな変化がない。現状の補助金では、太陽光発電のコスト低減や導入促進にあまり寄与しないため、炭素税や補助金の増額、耐用年数の延長などが必要である。

定置用燃料電池は、進歩率が80%を確保できれば、既存技術に対して競争力を持ち、導入量が拡大していく。この場合、リン酸形燃料電池が2015年の時点で44万円/kW、2030年の時点で25万円/kWである。進歩率85%の場合でも太陽光発電に比べて、導入量が多くなる。この場合、リン酸形燃料電池が2015年の時点で70万円/kW、2030年の時点で46万円/kWである。

今後は、炭素税が補助金に還元される部分に焦点をあて、新エネルギー技術の補助金に関する感度分析を行い、新エネルギー技術が市場に普及する条件をさらに明確にする。また、補助金効果と学習効果の対象として、バイオマス発電、天然ガス自動車、エタノール自動車などを含めることを検討し、モデルの拡充を図る。さらに、水素供給のインフラ整備に必要なコストが与える影響や電力供給のコンバインドサイクル発電の技術開発の動向などに着目した分析を試みる。

MARKALを利用するにあたり、(独)日本原子力研究開発機構の佐藤 治氏に多大なるご指導を頂戴しました。ここに記して、深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 経済産業省；新・国家エネルギー戦略について
<http://www.meti.go.jp/press/20060531004/20060531004.html> (アクセス日2006.6.1)。
- 2) 植屋 治紀, 小林 紀；学習曲線による燃料電池コストの分析, エネルギー・資源, 24-4 (2003), 57-62.
- 3) 一戸 誠之, 遠藤 栄一；我が国の乗用車部門における二酸化炭素排出削減のためのMARKALモデルを用いた車種構成分析, エネルギー・資源, 26-2 (2005), 42-48.
- 4) S. Messner ; Endogenized Technological Learning in an Energy Systems Model, Journal of Evolutionary Economics, 7 (1997), 291-323.
- 5) N. Mattsson and C. O. Wene ; Assessing new energy technologies using an energy system model with endogenized experience curves, International Journal of Energy Research, 21 (1997), 385-393.
- 6) A. Seebregts, T. Kram, G. J. Schaeffer and A. Bos ; Endogenous learning and technology clustering : analysis with MARKAL model of the Western European energy system, International Journal of Global Energy Issues, 14 (2000), 289-319.
- 7) S. Kypreos, L. Barreto, P. Capros and S. Messner ; ERIS : A Model Prototype with Endogenous Technological Change, International Journal of Global Energy Issues, 14 (2000), 374-397.
- 8) ETSAP ; <http://www.etsap.org/> (アクセス日2006.6.1)。
- 9) 佐藤 治, 下田 誠, 立松 研二, 田所 啓弘；我が国における二酸化炭素削減戦略と原子力の役割, JAERI-Research, 99-015 (1999)。
- 10) 後藤 純孝, 佐藤 治, 田所 啓弘；我が国の長期エネルギーシステムのモデル化, JAERI-Research, 99-046 (1999)。
- 11) S. Kypreos ; Allocation of carbon tax revenues, Operations Research and Environmental Management, Kluwer Academic Publishers, (1996), 133-152.
- 12) 山口 雅教, 佐藤 治；太陽光発電の習熟特性に関する調査, JAERI-Review, 2002-013 (2002)。
- 13) NEDO；新エネルギー関連データ (平成16年度版), <http://www.nedo.go.jp/nedata/16fy/index.html> (アクセス日2006.4.10)。
- 14) 環境省；環境税 (温暖化対策税制) について, <http://www.env.go.jp/policy/tax/kento.html> (アクセス日2006.4.10)。
- 15) 島崎 洋一, 北嶋 敏憲；学習曲線を考慮した新エネルギー技術導入の感度分析, 第24回エネルギー・資源学会研究発表会講演論文集, (2005), 299-302.