

# 太陽光発電および定置用燃料電池システムに関する量産効果を考慮した技術開発・普及戦略

## Research, Development, and Deployment Strategies of Photovoltaic and Stationary Fuel Cell Energy Systems Considering the Effects of System Mass Production

二酸化炭素排出削減効果のある製品の中には、太陽光発電システムや定置用固体高分子形燃料電池システムのように現状では高コストなものが存在する。しかし、さらなる研究開発と増産を進めることによってエネルギー変換効率向上といった技術進歩に加えて規模の経済・経験習熟といった量産効果が生じ、コストは低下しうる。本稿では、これらのコスト低下要因について定量的な分析を行い、2030年頃までに上記システムを経済的に成立可能とするために求められる技術開発と普及のロードマップの提示を試みる。

Some low-carbon energy equipment such as photovoltaic and stationary polymer electrolyte fuel cell energy systems are expensive carbon-mitigation options at present. However, facilitating the research, development, and deployment (RD&D) of such technologies can induce technological progress, such as improving the energy conversion efficiency, and the economic effects of mass production via economies of scale and learning by doing, which result in cost reduction. Through a quantitative analysis of these cost reduction factors, this paper provides the RD&D roadmaps that must be followed to make the above-mentioned systems economically viable by around 2030.

### 1. はじめに

二酸化炭素の排出削減が望まれる中、それを実現するためのさまざまな新製品が開発されている。これらの中には、耐用期間全体での投資回収の観点からは現時点で既に従来型の製品よりも低コストあるいは僅かな費用増加にとどまるものが多い一方、まだ相当に高価で、炭素排出削減効果に対して費用が過大であると言わざるを得ないものも存在する。例えば、住宅向けに販売が進みつつあり、今後は事業用での普及も期待されている太陽光発電システムや、2009年度から市販が開始された、主に戸建住宅向けの1kW級固体高分子形燃料電池システム（通称「エネファーム」、以下では単に燃料電池システムと呼ぶ）などが後者の製品に該当する。

しかしながらこうした製品は、さらなる技術進歩によるエネルギー変換効率の向上が期待される上に、普及支援策による生産量の増加に伴う量産効

果、すなわち生産規模を増大させるほど単位生産量あたりの平均費用が低下するという規模の経済の効果や、工事費などの労働集約的な工程での経験習熟効果が見込まれるので、技術開発と普及促進を適切に誘導することにより、中長期的には費用が十分に経済的に成立しうる水準に達しうるであろう。本稿では、太陽光発電システムと燃料電池システムを例として採り上げ、2030年を目途としたときに我が国においてこれらの製品が経済的に成立可能とするために求められる技術進歩と生産量拡大の水準を定量的に分析することによって、今後の技術開発・普及戦略に関する示唆を得ることを目的とする。

### 2. 技術開発・普及戦略の分析方法

本稿の分析では、既に掲げられている太陽光発電システムおよび燃料電池システムの技術開発目標<sup>(1)(2)</sup>や国内での普及目標<sup>(3)(4)</sup>を踏まえつつ、量産による費用低減効果を過去の実績やメーカーの見通しに

小杉 隆信

立命館大学政策科学部 准教授

KOSUGI, Takanobu

Associate Professor,  
College of Policy Science, Ritsumeikan University

基づいて見積もることで、2030年度にこれらのシステムが経済的に成立するために必要となる技術進歩と量産の規模を定量的に示す。ここで、システムが経済的に成立するとは、耐用年均等化費用がシステムの導入により代替されるベースラインシステムと同水準となり、炭素排出削減費用が0になることを指す。後に詳述するように、経済的に成立するのに十分な量産効果を得るためには国内向けのみならず海外への出荷向けの生産量を増加することが求められ、その必要水準を探索的に想定することとした。

製品のコスト低下のメカニズムとしては、製品の普及による市場規模の拡大により研究開発投資が促進されて技術進歩が生じ、それが費用低下を促して更なる普及に貢献するという正のフィードバック効果も存在するものと考えられるが、こうした効果の分析枠組みは必ずしも確立されているとはいえないので、本分析では技術進歩と量産効果がそれぞれ独立に生じるとして扱う。ここで、本分析で想定しているのは既存技術の改良型の技術進歩であり、革新的な技術は分析対象外であることに留意されたい。

分析にあたっての前提条件をまとめたものを表1に示す。本稿において燃料の発熱量は高位発熱量（総発熱量）基準で、価格はすべて2008年度実質換算で表示している。

量産による費用低減効果としては、製品本体については規模の経済が働くものと考え、年間総生産量（国内向けと海外向け出荷量合計）の倍増に伴い一定率で費用が低下するものとした。一方、本体以外の工事費等については経験習熟効果を想定し、累積国内向け出荷の倍増に伴う一定率の費用低下を見込んだ。

太陽光発電あるいは燃料電池システムによる発電は

系統電源の一部を代替することになる。その代替分の電源の炭素排出係数すなわち限界電源炭素排出係数として採用すべき値としては種々の議論があるが、ここでは国内クレジット制度の排出削減方法論<sup>(5)</sup>において示されている値を用いることとした。一方、代替分の系統電源やガス給湯器での熱供給の原価の計算には、これらの燃料費としての液化天然ガス（LNG）消費額を用いることとし、その単価として2008年度の平均値<sup>(6)</sup>を採用することにした。これらの値は時間の経過とともに変化すべきものであるが、ここでは簡単のため、2030年度においても同じ値であると想定した。

国内向けの商品出荷量の伸びについては、普及目標を参考にして2030年度における累積出荷量を与えた上で、各年の出荷量が、新しい製品の普及率の時間的経路を表すのによく適用されるロジスティック曲線に沿って徐々に増加するものとした。

なお、特に供給が不安定な太陽光発電に関しては大量導入時に系統電源側で系統安定化のための追加的な費用が掛かることが指摘されているが、この費用は本分析では考慮に入れていない。また、炭素排出量の計算にあたっては製品の生産過程での排出分は算入していない。

### 3. 分析の結果

#### 3.1 太陽光発電システム

太陽光発電システムの生産・出荷が本格化し始めた1970年代終盤以来、主流を占め続けている結晶シリコン系太陽電池の量産品のモジュール変換効率は90年代まで年に0.25%~0.3%ポイント程度のペース

表1 分析における前提条件

システム	太陽光発電	燃料電池
技術進歩（現状 2030年度）		
エネルギー効率	14.3% 24.4% （モジュール）	28.9% 35.0%*1 33.0% 39.6%*2
耐用年数	20年 30年	10年（変化なし）
量産による費用低減効果*3		
本体*4	- 14% / 年間総出荷倍増	- 19% / 年間総出荷倍増
本体以外（設置工事費含む）	- 17% / 累積国内向け出荷倍増	- 11% / 累積国内向け出荷倍増
ベースラインシステム	系統電源（火力）	系統電源（火力）+ ガス給湯器
限界電源炭素排出係数	0.15 炭素トン / MWh（受電端）	
液化天然ガス（LNG）価格	1.21 円 / MJ	
金利	3% / 年	
2030年度における累積出荷量		
国内向け	住宅 30GW + その他 35GW	800 万台
海外向け	耐用年均等化費用がベースラインシステムと同等になるように想定	

\*1 電利用効率 \*2 熱利用効率 \*3 技術進歩による費用低減効果を除く。

\*4 太陽光発電システムについては太陽電池モジュール、燃料電池システムについては設置工事費以外のシステム機器全体を指す。

で順調に伸び<sup>(7)</sup>、今世紀に入ってから伸びは鈍化傾向にあるものの、現在では市場占有率の過半を占める多結晶型モジュールで14%を超えるに至っている。今後はさらなる技術開発によりモジュール変換効率が結晶シリコン系の理論効率へと近づき、2030年度には独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）による太陽光発電ロードマップPV2030+<sup>(1)</sup>が目標として掲げている25%近くまで向上すると想定した。耐用年数は現状では20年とされるが、これもPV2030+に基づき30年まで伸びるとした。

太陽電池モジュール生産の規模の経済としては、1979年度から2008年度までのモジュール費<sup>(8)</sup><sup>(9)</sup><sup>(10)</sup>から技術進歩による効率向上というコスト低下要因を除いたもの（すなわちモジュール費に効率を乗じたもの）と年間出荷量との関係を示す図1から分かるように、変換効率の上昇分を差し引くと、モジュール費は総出荷量の倍増ごとに14%低下するというペースで推移している。モジュール以外の周辺機器・設置工事費については、1994年度から2008年度までの住宅向けの費用<sup>(9)</sup><sup>(10)</sup>に基づく分析の結果、累積国内出荷量が2倍になると17%低下するというペースで推移している。これらの傾向が将来にわたって続くものと想定した。

太陽光発電システムの出荷量の推移の想定を図2に示す（2009年度までの実績はNEDO<sup>(11)</sup>および一般社団法人太陽光発電協会<sup>(12)</sup>に基づく）。2030年度に向けて累積で国内向けには戸建住宅用として戸建ストックの6割への導入相当量（潜在的導入可能量<sup>(4)</sup>）の半分に当たる30GW（=3千万kW）、戸建住宅以外に35GWの合計65GW（潜在的総導入可能量の3割）に達するように各年の出荷量を想定した。この量は、長期エネルギー需給見通し（再計算）による値（最大導入ケース）<sup>(3)</sup>と低炭素社会構築に向けた再生可能エネルギー普及方策検討会による値<sup>(4)</sup>の間の値に当たる。海外向けの出荷量は、国内向け出荷量の2.1倍と想定した。この倍率は、2003～2009年度における実績（加重平均）値にほぼ相当する。国内向けと海外向けとを合わせた年間総出荷量は2030年度で23.6GWであり、この水準に向けて今後、一定率ではないが平均年率で13%のペースで増加すると想定したことになる。

以上に示したモジュール変換効率の向上と出荷量の増加に伴う量産効果により、太陽光発電システム費用（工事費込み）は2008年度の66.9万円/kW<sup>(10)</sup>から図3に示すように低下し、2018年度には40万円/kWを割り込み、2030年度には23.8万円/kWに達すると推計される。

このとき、耐用年均等化システム費用を耐用年数

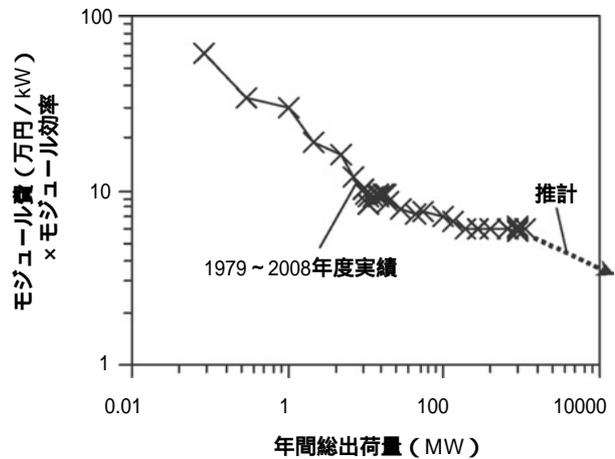


図1 太陽電池モジュールの量産効果（規模の経済）

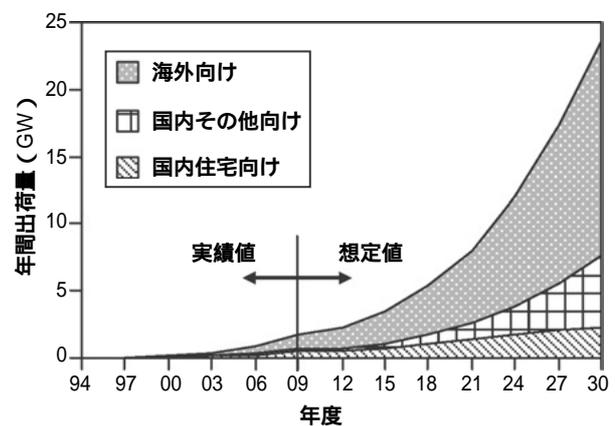


図2 太陽光発電システム出荷量の推移

の延長を勘案して算出し、設備利用率を12%として求められる太陽光発電電力量が系統発電に代替されるとしてLNG火力の燃料費相当分のエネルギー原価が節約できるとし、さらに表1に示した限界電源炭素排出係数に基づき炭素排出削減量を計算した上で太陽光発電システムの炭素排出削減費用を推計すると、図3に示すように2008年度では20.8万円/炭素トンという高水準にあるものの、2021年度には5万円/炭素トンを下回り、2030年度には排出削減費用が0、すなわち太陽光発電システムが経済的に成立すると見積もられる。

図2に示した出荷量と図3に示した費用から国内生産額を推計したものを図4に示す。ここで海外向けには本体だけが輸出されると仮定し、本体以外については国内生産額には含めていない。我が国における太陽光発電システムの産業規模は間もなく1兆円に達し、平均年率8%で伸びて2030年度には4兆円規模にまで成長することになる。

### 3.2 燃料電池システム

燃料電池システムは電力と熱（湯）を併給する

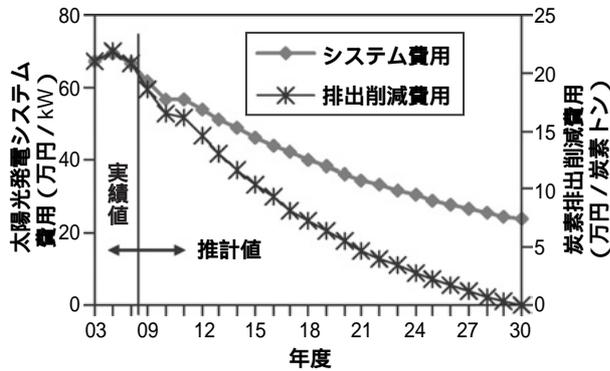


図3 太陽光発電システム費用(工事費込み)と炭素排出削減費用の推移

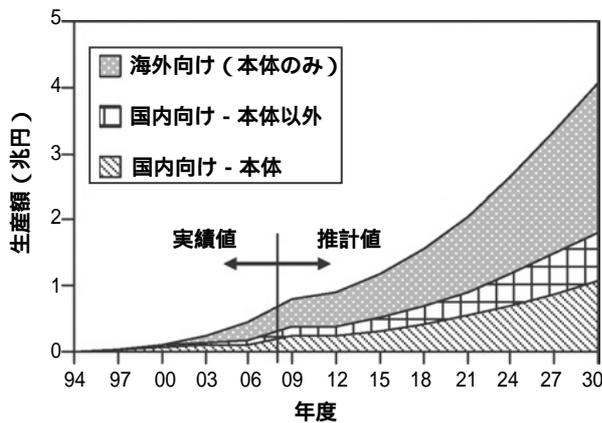


図4 太陽光発電システム国内生産額の推移

コージェネレーションシステムである。2008年度に定置用燃料電池大規模実証事業として設置されたシステムの1台あたりの平均稼働実績<sup>(13)</sup>によれば、年間38.5GJの燃料を消費して電力と熱をそれぞれ3.10MWhおよび12.7GJ供給しており、電気利用効率および熱利用効率は平均でそれぞれ28.9%および33.0%であった。同事業において最も高い効率を示したものは電気利用効率35%、熱利用効率40%に達していることを踏まえて、2030年に向けて燃料電池スタック・補機性能の向上と運転制御システムの高度化により設置システム平均でこれらの効率が実現できるように効率が改善されていくものとした。この効率改善に応じて電力と熱の供給量が増加すると仮定し、それぞれの供給分が系統電源(火力発電)と従来型ガス給湯器による熱供給を代替するとすれば、1台あたりの年間の一次エネルギー(天然ガス)消費削減量と炭素排出削減量は図5に示すように推計され、いずれも向こう20年間でほぼ倍増する。

耐用年数は起動停止可能回数によって制約されるが、その回数は燃料電池・水素技術開発ロードマップ<sup>(2)</sup>では現状の4000回(耐用年数10年相当)から将来にわたって増えるとは想定されていないことや、従来型のガス給湯器の耐用年数が10年程度であ

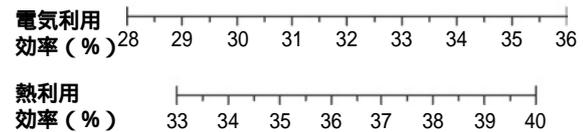
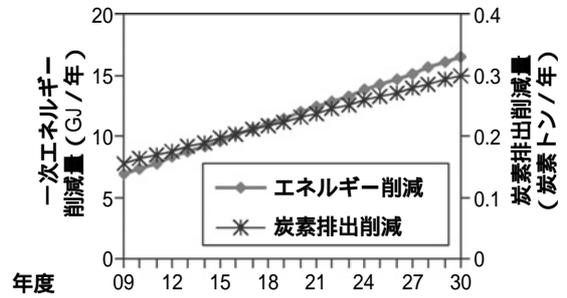


図5 燃料電池システム1台あたりの一次エネルギー削減量と炭素排出削減量

ることを参考にして、2030年においても現状と変わらず10年とした。

本システムは実証研究の開始が2002年度であり、一般販売は2009年度に始まったばかりであることから、量産による費用低減効果を実績値から推計するのは難しい。そこで、本体の生産規模拡大に伴う平均費用の低下(規模の経済)についてはメーカーによる見通し<sup>(14)</sup>を、経験習熟による設置工事費の低下については燃料電池システムの代わりに1994~2008年度の住宅用太陽光発電システムの国内電力用出荷量と工事費の実績<sup>(9)・(10)・(12)</sup>を参考にして見積もることとした。その結果、本体費用は総出荷量の倍増ごとに19%低下、工事費は累積国内出荷の倍増ごとに11%低下すると想定した。

本稿で分析対象としている燃料電池システムは、基本的には戸建住宅での設置を想定している。太陽光発電システムの場合と同様に、国内向けの潜在的導入可能対象を戸建住宅ストック数の6割とし、その約半分に当たる800万台が2030年までに累積で出荷されるとして、各年の国内向け出荷量を図6のように想定した。海外向けの出荷は現状では皆無であるが、総出荷量に占める割合を徐々に高めて、2030年度には総出荷量の8割(国内向け出荷量の4倍)に達するとした。国内向けと海外向けとを合わせた年間総出荷量は平均年率41%というハイペースで増加し、2030年度には700万台を超えると想定したことになる。

上記のような量産化により、燃料電池システム費用(工事費込み)は1台340万円以上する現状から、図7に示すように2020年度に100万円を下回り、2030年度には44万円まで低下すると推計される。このシステム費用から従来型ガス給湯器の費用を控除したものを耐用年で均等化し、ベースラインシステムに対する年間燃料節約額を差し引いたものを、図5に

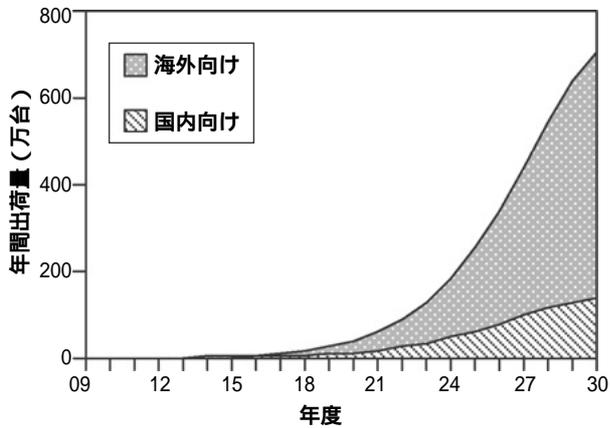


図6 燃料電池システム出荷量の推移

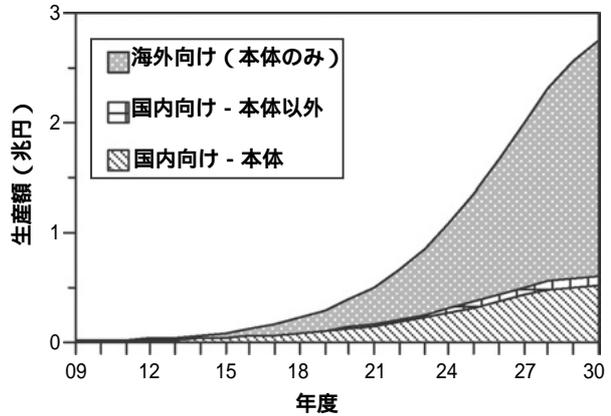


図8 燃料電池システム生産額の推移

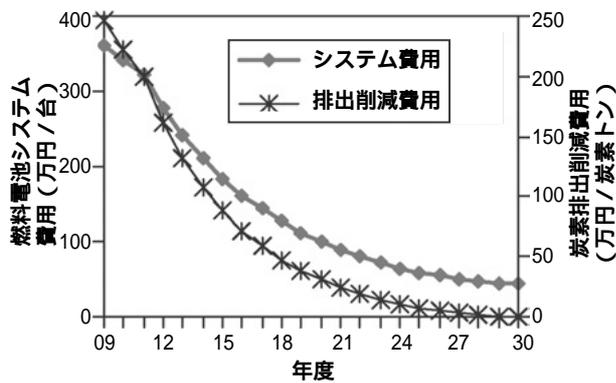


図7 燃料電池システム費用(工事費込み)と炭素排出削減費用の推移

示した年間炭素排出削減量で除すことによって炭素排出削減費用を推計すると、現在は200万円/炭素トン以上という極めて高水準にあるが、今後、図7のように費用は低下し、2022年度に現在の太陽光発電システムの排出削減費用に相当する20万円/炭素トンを経て、2030年度に0に至る。

燃料電池システムの出荷量と費用から生産額を見積もると図8のようになり、現状の200億円から平均年率27%で成長して2030年度には3兆円に迫り、先述の太陽光発電システムの産業規模に近づく。

#### 4. まとめ

太陽光発電システムと燃料電池システムを対象として、これらが2030年度までに経済的に成立するために求められる技術と普及の水準について定量的な分析を行った。

技術進歩によるエネルギー効率の向上と耐用年数の延長に加え、国内向けおよび海外向けの出荷増に伴う量産効果により、従来システムと比較して追加的に掛かる費用を低下させて2030年までに0にすることは可能であり、本稿では、そのために必要な技術

進歩と出荷量の将来経路の具体例を示した。

これらの要因が費用低下に果たす役割を図9に示す。この図は、それぞれのシステムの現状を基点として、まず他の条件を一定としてエネルギー効率だけを2030年度の想定水準に向上させた場合の炭素排出削減費用を推計し、次に、この効率向上に加えて(太陽光発電システムの場合のみ)耐用年数を2030年水準に延長した場合の費用を推計し、次には、これらに加えて国内住宅向け出荷量を2030年度水準に増やして推計し、というようにして、各要因による炭素排出削減費用低下への貢献度を示したものである。なお、この計算の順序によって各要因の費用低下への貢献度は若干異なって推計されるが、大まかな傾向には変わりはない。

図9から分かるように、いずれのシステムに関しても技術進歩は費用低減に一定の効果はあるが、それだけでは十分な費用低下には至らず、2030年度までに経済的に成立するためには生産規模の増大によって量産効果を通じた大幅な費用低下に期待する必要がある。このうち、内需拡大による量産効果で8分の1(太陽光発電)あるいは13分の1(燃料電池)

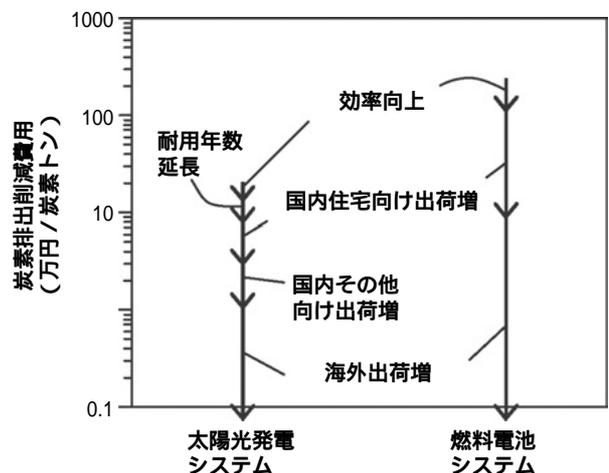


図9 太陽光発電および燃料電池システムの費用低下の内訳

池)の費用低減効果を見込んだ上で、さらに輸出の促進によってそれ以上の効果を挙げることが求められる。このことは、我が国の市場規模では量産効果を十分に発揮するには不十分であることを示唆している。

現状ではコスト高であるこれらのシステムについて本稿で示されたような生産規模の増大を現実のものとするためには、さまざまな普及施策が不可欠である。望まれる具体的な施策の検討については本稿の範囲を超えるが、内需拡大のためには従来から行われているシステム設置の補助金のほか、太陽光発電の固定価格買取制度の充実や燃料電池・コージェネレーションシステムに対する電力買取制度の導入などによって経済的不利の少なくとも一部を相殺することによって消費者の購入意思を高めることが必要となる。一方、輸出の促進のためには、上記の内需拡大に伴う量産効果でシステム費用を低下させることによって輸出競争力を高めることに加えて、海外での需要が喚起されなければならない。太陽光発電については世界各国において手厚い導入促進支援策が施されることで旺盛な需要が存在しているが、燃料電池システムについては必ずしもそうとは言えないので、我が国での普及による炭素排出削減の実績を積み上げて、同システムの普及施策の重要性を世界に強くアピールすることが期待される。さらに、京都議定書に基づく国別排出量目標達成の柔軟性措置であるクリーン開発メカニズムや共同実施、そして我が国が提案している二国間メカニズムのような新たな市場メカニズムが今後できればそれも活用することを考えて、これらのシステムの海外での設置先を積極的に開拓することが望まれる。

上記のような普及のための政策措置の実施は、短中期的には炭素排出削減効果に比して費用が高くつくだろうが、国内での生産額の増加に伴う雇用等の付加価値の向上や、輸出産業としての成長による我が国の貿易収支の改善に貢献しうるのみならず、量産効果により長期的にシステムの経済性が従来のものよりも有利になれば、その後は経済的便益を得ながら炭素排出削減を行えることになる。ただし、本稿では技術進歩を外生条件として与えたが、技術進歩が技術開発投資の増加によって促進できると仮定すれば、当面は普及促進策よりも技術開発に対して重点的に投資を行う方が経済的に良策かもしれない。こうした側面なども考慮に入れ、長期的な費用と便益とを比較考量した上で最も適切な費用低減誘導策の時間的経路を定量的に検討することが、今後の重要な課題として残されている。

(本研究は、環境経済の政策研究「低炭素社会へ向けての各種経済的手法の短・中・長期的及びポリシーミックス効果の評価」の一環として行われたものである。助言をいただいた研究代表者の佐和隆光滋賀大学長をはじめとする研究メンバーに感謝申し上げます。)

#### 《参考文献》

- (1) 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構新エネルギー技術開発部・2030年に向けた太陽光発電ロードマップ(PV2030)に関する見直し検討委員会：太陽光発電ロードマップ(PV2030+)(2009)：<http://www.nedo.go.jp/library/pv2030/> (2011年1月14日時点掲載)
- (2) 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構新エネルギー部燃料電池・水素グループ：燃料電池・水素技術開発ロードマップ2010(2010)：<https://app3.infoc.nedo.go.jp/informations/koubo/other/FF/nedoothnewsplace.2009-02-09.3960481985/nedoothnews.2010-07-14.2342472174/> (2011年1月14日時点掲載)
- (3) 総合資源エネルギー調査会需給部会：長期エネルギー需給見通し(再計算)(2009)：<http://www.meti.go.jp/report/downloadfiles/g90902a01j.pdf> (2011年1月14日時点掲載)
- (4) 低炭素社会構築に向けた再生可能エネルギー普及方策検討会：低炭素社会構築に向けた再生可能エネルギー普及方策について(提言)(2009)：[http://www.env.go.jp/earth/ondanka/mlt\\_roadmap/comm/com05\\_h20a.html](http://www.env.go.jp/earth/ondanka/mlt_roadmap/comm/com05_h20a.html) (2011年1月14日時点掲載)
- (5) 国内クレジット認証委員会：排出削減方法論について(2010)：[http://jcdm.jp/process/data/methodology\\_v2.pdf](http://jcdm.jp/process/data/methodology_v2.pdf) (2011年1月14日時点掲載)
- (6) 財団法人日本エネルギー経済研究所計量分析ユニット：EDMC/エネルギー・経済統計要覧(2010年版) 財団法人省エネルギーセンター(2010)
- (7) F. Nemet：Beyond the learning curve：factors influencing cost reductions in photovoltaics, *Energy Policy*, 34, 3218-3232 (2006)
- (8) 榎屋治紀：学習曲線による新エネルギーのコスト分析、*太陽エネルギー*、25、37-41(1999)
- (9) 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構：新エネルギー関連データ集(平成16年度版)太陽光発電 設置価格・稼働コスト(2005)：<http://www.nedo.go.jp/nedata/16fy/01/g/0001g001.html> (2010年8月10日時点掲載)
- (10) 一般社団法人新エネルギー導入促進協議会：平成20年度住宅用太陽光発電システム導入状況に関する調査(2009)：<http://www.nepc.or.jp/topics/pdf/0900817.pdf> (2011年1月14日時点掲載)
- (11) 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構：新エネルギー関連データ集(平成16年度版)太陽光発電 導入量・導入推移(2005)：<http://www.nedo.go.jp/nedata/16fy/01/e/0001e004-03.html> (2010年8月10日時点掲載)
- (12) 一般社団法人太陽光発電協会：日本における太陽電池出荷量の推移(2010)：<http://www.jpea.gr.jp/pdf/qlg2010.pdf> (2011年1月14日時点掲載)
- (13) 財団法人新エネルギー財団：平成21年度定置用燃料電池大規模実証事業報告書(2010)：[http://www.nef.or.jp/happyfc/pdf/h21b\\_report.pdf](http://www.nef.or.jp/happyfc/pdf/h21b_report.pdf) (2011年1月14日時点掲載)
- (14) 経済産業省：定置用燃料電池市場化戦略検討会報告書、官公庁環境専門資料、40、41～68(2005)