

# 技術革新と温暖化政策：エネルギー部門の 技術開発における論点と対策オプション\*

マイケル・グラブ  
信岡洋子 訳

## 要 旨

温室効果ガスの大気中濃度を安定化させるには、排出量の大幅な削減が必要である。許容できる社会的コストの範囲内で大幅な削減を実現するには、エネルギー、その他の部門において広範囲に及ぶ革新的技術の開発が求められる。温暖化問題に関して国際的な合意を得ることは大変難しいが、技術革新の必要性に関しては異論がないようである。しかし、温暖化問題に対応するために革新的技術の開発を促進するにはどうすればよいのかという点や、その政策上の含意については、学者や政策アナリストの間には意見の相違がみられる。また、技術の開発を促進するような政策を立案・実施するには、国内・国際の両レベルでの制度的課題もある。

本稿ではまず、温暖化政策における技術開発の促進をめぐる異なる見解を紹介する。そして技術革新を経済学視点から理解することによって、将来への道筋を示せることを示し、異なる見解の統合を試みる。

## キーワード

技術革新、エネルギー関連技術、地球温暖化、研究開発、エネルギー関連投資

## 1. 温室効果ガス濃度安定化に向けて

### 1.1 概 観

経済の拡大と人口増加によって、世界のエネルギー起源の二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）排出量は、特段の対策がなされない場合、21 世紀半ばまでに現在の少なくとも 2 倍に増えると予想される（Nakicenovic et al. 2000）。一方、大気中の温室効果ガス（GHG）濃度をどのレベルに安定化しようとしても究極的には大幅な排出削減が必要である。したがって、エネルギーシステムの根本的な変革が必要なのは当然であり、問題はその時期と方法である（Edmonds et al. 2001）。何か国かの先進国の政府が提案しているように、今世紀半ば（2050 年）までに先進国が排出量を現在の 50～60 %削減すれば、先進国は現在の世界の 1 人当たり平均排出量に近いレベルになる。このことは、GDP に対する炭

\* この論文は山口光恒教授の退任を記念して、執筆し、*Keio Economic Studies* Vol.41, No.2, 2004 に掲載された *Technology Innovation and Climate Change Policy: An Overview of Issues and Options* の翻訳である。

素排出原単位を 1990 年対比で約 10 分の 1 にまで下げなければならないということを暗に示している。過大なコストなしで、つまり経済に大きな悪影響を与えることなしにこのような難関を乗り越えるには、革新的技術の開発が必要であることは言うまでもない。

このような中、既存のエネルギーシステムを変えるような特効薬、言い換えると、技術の飛躍的進歩がある日突然現れることを期待したくなるのはもっともである。しかしこのような期待を抱くことは現実的ではなく、技術革新に対する正しい考え方とはいえない。真の技術革新のために直面する困難、そして真の技術革新がもたらすチャンスはより複雑でより興味深いものである。

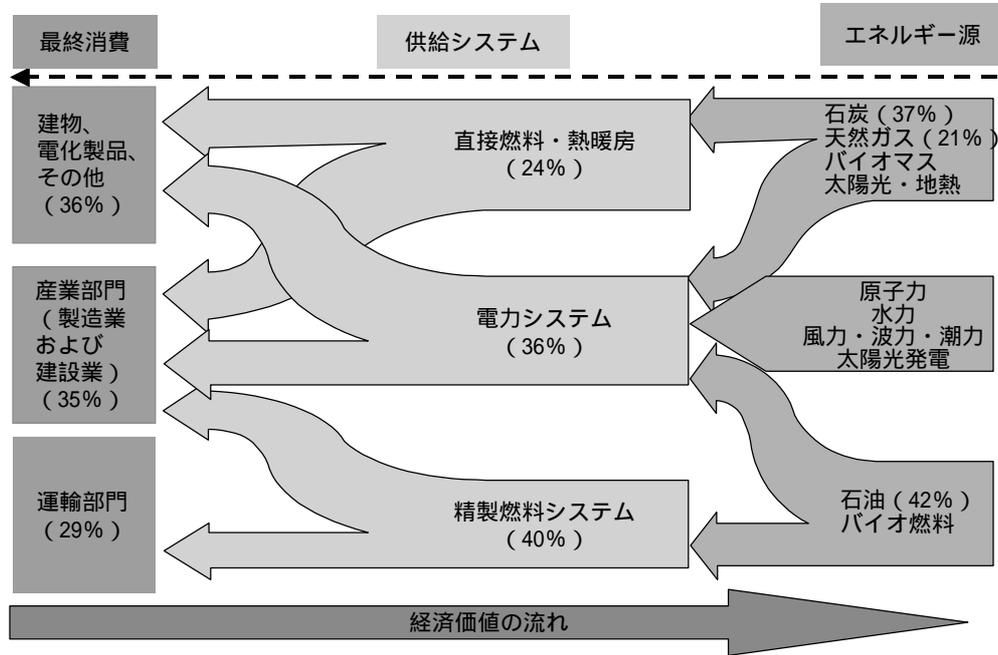
まず重要なのは、温暖化問題の困難性は様々なシステムの中に多岐に亘って存在するという点である。周知のとおり、温暖化問題には数種類に及ぶ GHG と様々な排出源が関わっており、この問題に取り組むにはそれら全てを考慮しなくてはならない。例えば、GHG は化石燃料の燃焼に加え、農業、土地利用、直接的な工業プロセスからも排出される。先進国の GHG 排出量の 80 % を占める化石燃料の燃焼においても、そこからの GHG 排出は様々なエネルギー供給システムを起源とするもので、それらのシステムも根本的に異なるプロセスを有する。したがって、それぞれのプロセスに対応した技術的解決策が必要なのである。しかしこのことはあまり知られていない。

エネルギー起源の CO<sub>2</sub> 排出は 3 つの部門（建物、産業、運輸）におけるエネルギー需要に起因し、エネルギーは電力、精製燃料、直接燃料供給を通じて供給される（図 1）。ここで、CO<sub>2</sub> 排出を大幅に削減する方策として挙げられるのがエネルギー供給技術の脱炭素化である。もしたった 1 つでも、あるいは 2、3 の、CO<sub>2</sub> を全く排出しないエネルギー供給技術があり、それだけでエネルギー転換システムの全てに亘り投入エネルギーを従来に比べて 10 倍も脱炭素化することが可能であれば、エネルギーの最終消費段階で大幅な効率改善ができなくても、GHG 排出の大幅な削減は可能かもしれない。しかし、これは現実的ではない。逆に、最終消費段階での効率性の大幅な改善が可能であれば低炭素のエネルギー供給システムの開発が必要でなくなる、ということもあり得ないだろう。つまり、大気中の（CO<sub>2</sub>）濃度安定化には最終消費の 3 部門全てにおいて効率的な技術・サービスの普及が必要で、それと同時にエネルギー供給面での着実な脱炭素化も進めなくてはならない。

## 1.2 世界のエネルギー資源

炭素排出の制限があろうとなかろうと、我々のエネルギーシステムを制約するのはエネルギー資源そのものではない。とはいえ、エネルギー資源の性質や地理的分布を考慮することは重要である。エネルギー資源は全体量として、また、再生可能エネルギー源を含む低炭素エネルギー資源についても同様であるが、その資源が限られていることが懸念されているわけではない（表 1、図 2 参照。訳注：再生可能エネルギー源については、図 2 左にある潜在エネルギー量と同図右の世界のエネルギー消費量との比較から、以上のことが導かれる）。それよりも制約条件は、エネルギー源と供給システムをいかに効率的に需要にマッチさせることができるかという点である。ここでは世界のエネルギー

図1 世界のエネルギーシステムの構成とCO<sub>2</sub>排出（2000年）



注：数字は異なるエネルギーシステムにおける世界規模のエネルギー起源 CO<sub>2</sub> 排出量の割合（％，燃料と電力の排出を含む）を示している。世界のエネルギーフローで 1％に満たないものは省く（運輸部門の電力・天然ガス等）。地域によってパターンは変化することに留意（先進国では産業部門の割合が低く運輸が高い，等）。また各部門は異なった規模で拡大している（過去 30 年間のエネルギー需要の部門別年平均伸び率は，建物，産業，運輸それぞれ 2.6％，1.7％，2.5％である）。非電力エネルギー（non-electric energy）産業（石油精製，天然ガス田の操業等で排出される CO<sub>2</sub> の量）は世界の CO<sub>2</sub> 排出量の 7％を占め，それは運輸，産業，建物その他の部門に 4％，1％，2％の比率で配分されている。精製燃料システムの割合は石油の全量から電力システムへのインプット分の石油を引いたもの。直接燃料・熱暖房はその残りとなる。

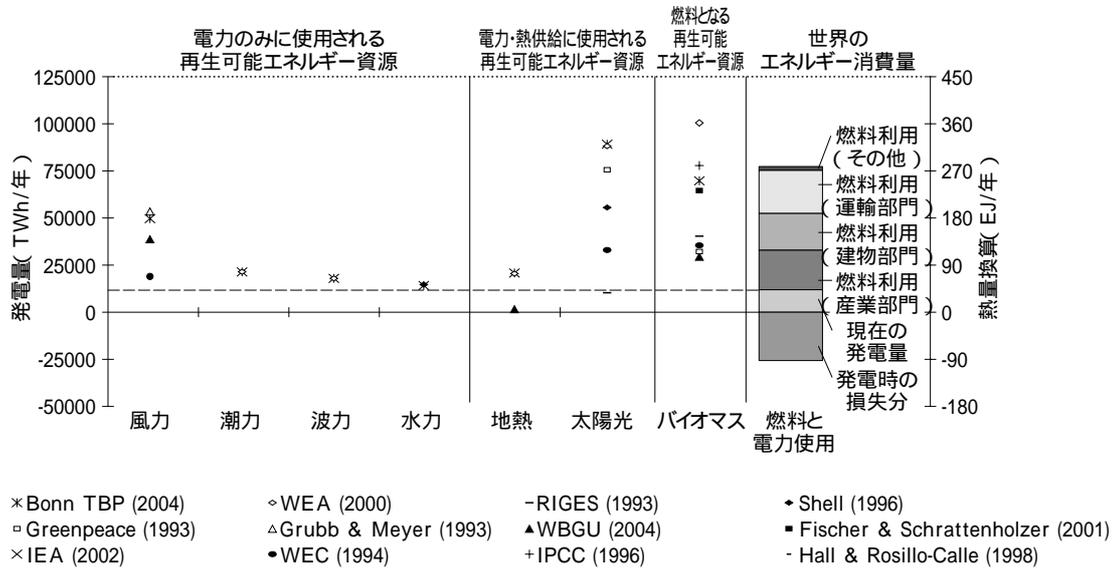
出所：エネルギー源のデータは EIA（2002），供給システム，最終消費に関するデータは IEA（2002）

資源について述べる。現在の石炭，石油，天然ガスの「確認可採埋蔵量」はそれぞれ現在の生産の 100 年，40 年，60 年分と言われている。石炭は技術進歩とともに生産が大幅に拡大するだろう。輸送コスト（と環境への影響）は相変わらず大きいものの，他の化石燃料と異なり（中国やアメリカといった）需要大国の国内に埋蔵されている。

一方で，在来型の石油資源の開発はおそらく現在の確認可採埋蔵量の 2 倍程度にとどまり，石油生産は今後 20 年がピークになると予想されている。しかし，非在来型の石油系資源（タールサンド，オイルシェール等）が今後炭素集約的なエネルギー源として普及してくると思われる。

燃料のうち，天然ガスに対する選好はますます強まる傾向にある。ただし，資源量では少なくとも石油に匹敵するものの，世界の主要な需要国・地域の近くに存在しないものが多く，世界の潜在埋蔵量の半分近くが「採掘不能（stranded）」と考えられている。しかしながら，全世界の天然ガス

図2 文献から見た世界の潜在再生可能エネルギー推定量と現在のエネルギー・電力需要量



出所:Neuhoff(2005) 詳細は同論文を参照のこと。

の4分の1は国際的に取引されており、また、現在進行中のパイプラインとLNG（液化天然ガス）の開発によって、天然ガスの価格を安定化し同資源へのアクセスを容易にするようなマーケットができつつある。

原子力に関しては、ウラン埋蔵量の枯渇によって原子力発電の拡大が大きく制約されるということは今世紀半ばまではまずないと言ってよいだろう。

同様に、再生可能エネルギー源の多くは、物理的なフローの点から見ると莫大である。様々な制約条件は存在するが、地球規模の潮力、波力、水力の潜在量は世界の電力消費の規模（図2の一番右の「現在の発電量」）に匹敵すると推定される。さらに、実現可能な風力、太陽光は上述の再生可能エネルギー源よりもはるかに大きいとする推定結果も多い（図2）。天然ガスと同じように、エネルギー供給の鍵となる論点はその配電システム、そして（太陽熱暖房、太陽光採光システム、地熱暖房というわずかな例外はあるが）バイオマス以外の全てのエネルギー源が一次電力（primary electricity、訳注：火力を除いた水力、原子力、太陽光、風力等、エネルギー源の燃焼を伴わない発電方法からの電力）を発生するという点である。

### 1.3 技術オプションと削減規模

それでは、具体的にどのような技術オプションが考えられ、どの程度のGHG排出量の削減が可能なのだろうか。

表 1 世界の化石燃料埋蔵量、資源、産出量

|                  | 消費量<br>(1860–1990 年) |     | 消費量<br>(1990 年) |     | 2020–2025 年の<br>確認可採埋蔵量<br>又は潜在埋蔵量 |      | 資源量*<br>又は<br>最大潜在埋蔵量 |      |
|------------------|----------------------|-----|-----------------|-----|------------------------------------|------|-----------------------|------|
|                  | EJ                   | GtC | EJ              | GtC | EJ                                 | GtC  | EJ                    | GtC  |
| 石油               |                      |     |                 |     |                                    |      |                       |      |
| 在来型              | 3343                 | 61  | 128             | 2.3 | 6000                               | 110  | 8500                  | 156  |
| 非在来型             | -                    | -   | -               | -   | 7100                               | 130  | 16100                 | 296  |
| 天然ガス             |                      |     |                 |     |                                    |      |                       |      |
| 在来型              | 1703                 | 26  | 71              | 1.1 | 4800                               | 72   | 9200                  | 138  |
| 非在来型             | -                    | -   | -               | -   | 6900                               | 103  | 26900                 | 403  |
| 石炭               | 5203                 | 131 | 91              | 2.3 | 25200                              | 638  | 125500                | 3173 |
| 化石燃料合計           | 10249                | 218 | 290             | 5.7 | 50000                              | 1053 | >186200               | 4166 |
| 原子力 <sup>a</sup> | 212                  | -   | 19              | -   | 1800                               | -    | >14200                | -    |
|                  |                      |     |                 |     | EJ/年                               |      | EJ/年                  |      |
| 水力               | 560                  | -   | 21              | -   | 35-55                              | -    | >130                  | -    |
| 地熱               | -                    | -   | < 1             | -   | 4                                  | -    | >20                   | -    |
| 風力               | -                    | -   | -               | -   | 7-10                               | -    | >130                  | -    |
| 海洋力              | -                    | -   | -               | -   | 2                                  | -    | >20                   | -    |
| 太陽光              | -                    | -   | -               | -   | 16-22                              | -    | >2600                 | -    |
| バイオマス            | 1150                 | -   | 55              | -   | 72-137                             | -    | >1300                 | -    |
| 再生可能エネルギー合計      | 1710                 | -   | 76              | -   | 130-230                            | -    | >4200                 | -    |

SARII, B3.3.1, 表 B-3 と B-4 に基づく。

<sup>a</sup> 原子力に関して、高速増殖炉が用いられればウラン埋蔵量と資源量の利用効率は 60 倍以上になる。

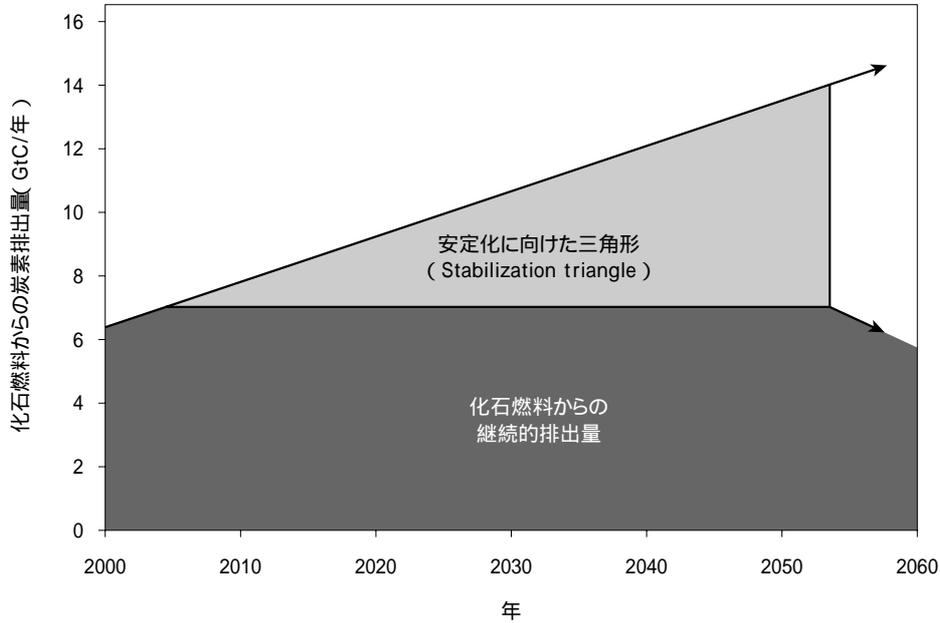
\*訳注：資源量 (resource base) とは経済的、技術的な制約等を考慮せず、地質学的に存在が予想される資源の量。

出所：“Table 9 Global energy reserves and resources, their carbon content, energy potentials by 2020-2050, and maximum technical potential” UNDP/WEC (2001)

Pacala and Socolow (2004) は、濃度安定化の目標とそれに対応する諸技術の規模に関して有用な方法を紹介している。大気中の GHG 濃度を産業革命以前の 2 倍以下におさえるには、CO<sub>2</sub> 排出量を今後 20 年をピークとし、それ以降永続的に減らし続けなくてはならない。同研究は、特段の対策を打たなければ (この状態を BAU, Business as Usual と呼ぶ)、地球規模での年間炭素排出量が現在の 70 億トンから 2050 年までに 140 億トンに倍増するが、年間 10 億トン程度の削減が可能な技術を 7 つ普及させ、排出量を 70 億トンに抑えることで CO<sub>2</sub> 濃度を工業化前の 2 倍の 500ppm 程度に安定化させることが可能であるという提案をしている (図 3 を参照)。

これらの潜在的 Wedge (削減技術オプション) には様々なものが挙げられる。自動車・電化製品・発電所の効率改善といったものから、原子力発電・再生可能エネルギーの拡大、炭素の回収・貯留、

図3 “プリンストンの安定化に向けた三角形”



注：CO<sub>2</sub> 排出量が 2050 年までに現在の年間 70 億トンから 140 億トンになるという BAU に対し、排出の安定化には 2050 年までに年間 70 億トンの「安定化に向けた三角形 (stabilization triangle)」分の削減が必要である。これは 7 つの楔 (くさび) (Wedge) に分けて考えると便利である。それぞれの Wedge は線形に現在の 0 から 2054 年には年間 10 億トンの排出量を回避できるような対策である。Wedge という単位は、世界の炭素排出量に大きな影響を与える対策を定量化する上で大変有用である。

そして森林管理・土壌管理によるシンク (炭素吸収量) の拡大などである。そして 10 億トン削減する技術オプションを 1 Wedge という単位を用いて表すことで、コスト、削減速度、リスクに関する定量的議論が可能になる。Wedge の例として、石炭火力発電に替えて 2MW の風力発電タービンの 100 万基設置、20 億台の自動車燃費の 1 ガロンあたり 30 マイルから 60 マイルへの向上、800GW の石炭火力発電から排出される炭素の回収・貯留、等を挙げている。

同研究では 15 の技術オプション (Wedge) を紹介しており、そのうち 13 はエネルギー・炭素関連の技術オプション (Wedge) である (表 2)。同研究によると、ここに挙げられている技術はすでに商業レベルで採用されており、根本的な技術革新はなくても可能である。今世紀前半という時間軸で見れば、温暖化問題は既存の技術を拡大・普及することで解決できる。一方で、技術一つ一つは大規模な拡大・普及が必要不可欠であり、そのことが新たな環境問題や社会問題を引き起こすことも考えられるので、個々の Wedge の達成は容易ではないとしている。

現実問題としては、Wedge を見ることで温暖化問題の複雑さがよく分かるということである。例えば、「エネルギー効率改善」という Wedge は、世界中で年間 10 億トンの排出削減をもたらす効

表 2 年間 10 億トン（炭素換算）削減可能な技術オプション（Wedge）

| 緩和策   | 2054 年まで年間 14 億トン（炭素換算）削減するための 1Wedge の具体的オプション  | 備考   |
|---|--|--|
| <b>エネルギー効率改善と省エネ</b>                        |  |  |
| 炭素原単位の低減（排出量/\$ GDP）                        | 毎年削減率を追加的に 0.15%上げる（例、毎年 1.96 %削減というアメリカの目標を 2.11 %に引き上げる）   | 温暖化政策によって調整可能                                |
| 1. 自動車の効率性改善                                | 燃費 30mpg（1 ガロン当たり 30 マイル）の自動車 20 億台を 60 マイルまで向上させる   | 自動車のサイズとパワー                                  |
| 2. 自動車利用の低減                                 | 燃費 30mpg の自動車 20 億台を年間 10,000 マイルの走行を 5,000 マイルに半減させる  | 都市デザイン、公共交通機関、テレコミュティング（パソコン等）を利用しての在宅勤務）    |
| 3. 建物の効率改善                                  | 2054 年に予測される建物、電化製品からの炭素排出を 4 分の 1 削減する  | インセンティブが弱い                                   |
| 4. 石炭火力のベースロード発電の効率改善                       | 現在の 2 倍の石炭火力からの電力量を 40%の代わりに 60%の効率で発電する（現在の効率は 32%）   | 超耐熱材料  |
| <b>燃料転換</b>                                 |  |  |
| 5. 石炭火力のベースロード発電を天然ガス火力に置き換える               | 1400GW、効率 50%の石炭火力発電を天然ガスに替える（現在の天然ガス発電量の 4 倍）   | 天然ガスへの競争的需要                                  |
| <b>CO<sub>2</sub> 回収・貯留</b>                 |  |  |
| 6. ベースロード発電所での CO <sub>2</sub> 回収・貯留        | 石炭火力からの 800GW の発電、もしくは天然ガス火力の 1600GW の発電に対して CO <sub>2</sub> 回収・貯留を導入する（1999 年は石炭火力 1060GW）  | 技術は既に水素製造のために用いられている                         |
| 7. 水素製造施設での CO <sub>2</sub> の回収・貯留          | 石炭から年間水素を 250MtH <sub>2</sub> もしくは天然ガスから年間 500MtH <sub>2</sub> 製造する工場に CO <sub>2</sub> 回収・貯留を導入する（現在は合計 40Mt H <sub>2</sub> ）                  | 水素の安全性、インフラ整備                                |
| 8. 石炭から合成燃料を製造する施設での CO <sub>2</sub> の回収・貯留 | （原料の含有する炭素の半分が回収可能であるとの仮定のもと）石炭から 1 日 30 百万バレルの合成燃料を製造する施設（南アフリカサソール社が現在製造する量の 200 倍に相当、同社は現在このような製造を大規模に行う唯一の企業）、に CO <sub>2</sub> 回収・貯留を導入する | 合成燃料が CO <sub>2</sub> 回収・貯留なしで製造されれば排出量が増加する |
| （オプション 6.7.8. のそれぞれには 3500 基の地中貯留設備が必要）     |  |  |

|  |   |                                 |
|--|---|---------------------------------|
| 原子力                                      |   |                                 |
| 9. 石炭火力発電所を原子力に置き換える                     | 700GW 分新設する（現在の 2 倍に増強）   | 核拡散とテロ，放射性廃棄物                   |
| 再生可能エネルギーと燃料                             |   |                                 |
| 10. 石炭火力発電所を風力発電に置き換える                   | 2 百万台の 1MW（ピーク時）の風車を新設する（現在の 50 倍に増強）<br>これは陸上または洋上 30 百万ヘクタールを占有する     | 風車は大きく間隔を空けて設置されるので土地の他利用が阻害される |
| 11. 石炭火力発電所を太陽光発電に置き換える                  | 2 百万ヘクタールに 2000GW 分（ピーク時）の発電施設を新設する（現在の 700 倍に増強）                       | 発電コスト                           |
| 12. ハイブリッド自動車のガソリンを燃料電池自動車の風力からの水素に置き換える | 4 百万台の 1MW（ピーク時）の風車を新設する（現在の 100 倍に増強）                                  | 水素の安全性，インフラ整備                   |
| 13. 化石燃料をバイオマス燃料に置き換える                   | 250 百万ヘクタールの土地を利用し（世界の農地面積の 6 分の 1），現在のブラジルあるいはアメリカのエタノール生産量の 100 倍増産する | 生物多様性，土地利用                      |

出所：Pacala and Socolow (2004)

率性改善を指しているが、これ以外の技術のほとんどは商業的に競争力があるとは言いがたく、このような技術を急激に普及させるのは困難であろう。この分析は温暖化問題の議論を進めていく上での 1 つのアプローチという点で有用であり、また技術面での問題は多岐にわたり複雑であることを示唆している。一方でそのような技術の大規模な拡大・普及をもたらすプロセスやそれを促すための新たな戦略への言及がない。本稿では以下、これらの点に関して述べる。

## 2. 研究開発主導 (technology-push) か市場主導 (demand-pull) か—その意義と実際

### 2.1 研究開発主導・市場主導議論の意義

温暖化問題において長期的な GHG 排出削減を扱う研究では、政策を講じる際に、技術開発についての仮定が意思決定において決定的な役割を果たすという点で一致している（例えば、Dowlatabadi 1998; Edmonds et al. 1999; World Resources Institute 2000）。欧米諸国では温暖化政策の議論にお

いて、技術革新のプロセスに関する2つの対立する見方がある。

まず「政府による研究開発主導」論である。この主張は、GHGを規制によって制限するよりも、公的な資金で研究開発を促進すること等を通じてGHG低排出技術の開発を進めることが重要だとするものである。さらに、地球温暖化がもたらすと考えられる様々な損害のリスクが長期の大気中のGHG蓄積量の関数として表せるとすると、短期的には技術革新に投資し、そしてGHG排出削減を安価にできるようになった時点で初めて排出量に制限を設けるのが望ましいとするものである(Wigley, Rishels and Edmonds, 1996)。また、Hoffer et al. (2002)はこの議論の中心的存在となっており、この研究によると、気候変動を解決するような技術は未だ存在せず、新たな原子力や宇宙基盤のエネルギー源(space-based energy sources)をも視野に入れた壮大な技術プログラムが必要である。

一方で、「市場主導」の考え方は、技術革新は民間企業部門から起こるべきで、経済的インセンティブの結果もたらされるというものである。温暖化問題の文脈で考えると、技術をベースとした規制、GHG排出量の絶対値規制、税といった手法の活用が有用である。民間企業はこれらの規制に対応するために、そして他社との競争で優位に立つために、低コストのGHG削減技術を開発する<sup>(1)</sup>。したがって、このアプローチによると、GHG排出量規制導入時期を遅らせると、その分企業の排出削減技術の開発も遅れる、ということになる。このアプローチでは技術革新の初期段階に市場の失敗が発生することが危惧される。例えば、企業から見ると、研究開発で得られた知的財産を(特許等を通じて)占有することができなかつたり、研究開発の投資回収が不確実で長期にわたったりすることが考えられるため、基礎研究に投資するにはインセンティブが不足であるということもありうる。市場主導派の主張は、このような場合であっても、(政府による研究開発の主導ではなく)既存の一般的な政策(企業のR&D支出に対する税制優遇措置等)の導入により、市場の失敗は十分カバーできる<sup>(2)</sup>という。

このような技術革新のプロセスに関する見解の相違は、多くの局面で正反対の政策となって顕在化する(表3)。ここで注目すべきは、実に多くの政策関連の論点が、技術革新のプロセスに対する考え方によって変わってくるということである。以下、本稿では、まずこれら2つの観点が二分法としてどちらかが正しく、どちらかが間違っているというのではなく、むしろ技術革新のプロセスにおいて有用な示唆を与える、ということを示す。次に、これらの議論によって、政策上の立場の違いを少しでも埋めることができるのか、そうであればどのようにできるのかを検証する。

---

(1) この観点は誘発的技術革新に関する相当数の文献において論じられている(例えば Weyant, J.P. and Olayson (1999)は論評, Grubb et al. (1995), Dowlatabadi (1998), Grubb, Koehler and Anderson (2002)は政策への含意について論じている)。

(2) 温暖化問題の適応策を促進するためにインセンティブとなるような規制の必要性は極めて低い。しかし、適応策の開発の公的R&Dは必要である。

表3 技術進歩に関する観点とそれに対応する政策オプション

| プロセス                                 | 研究開発主導の技術革新                                     | 市場主導の技術革新  |
|--------------------------------------|---|--|
|                                      | 技術革新は内在的な傾向と政府の R&D に大きく依存している                  | 技術革新は市場の変化に対応するための企業の投資 (R&D, 学習効果 (learning-by-doing)) に大きく依存している   |
| 経済的・政策的含意                            |   |  |
| 大規模な問題 (例えば温暖化問題) における長期的な経済的含意      | 大気中 GHG 濃度の安定化は R&D の大きな突破口がない限り非常にコスト高となるだろう   | 大気中 GHG 濃度の安定化は技術の蓄積に伴い低コストで可能   |
| 政策手法とコスト配分                           | 効率的な手法は政府の R&D, 必要に応じて (ピグー税等で) 外部性を内部化する手法を用いる | -排出絶対量に上限値を設けて取引させる排出権取引と様々な手法の組み合わせ等, 初期段階でのより積極的な対策が効率的<br>-これらにより企業の R&D 再編, 該当業種に対する市場ベースの技術革新の促進を狙う<br>-限界費用はばらつく |
| タイミング                                | 新しい技術でコストが低下するまで削減を遅延                           | 新しい技術のコストを下げるために削減を加速させる   |
| 排出量制限「先発者」の経済的優位性                    | コストがかかるだけで便益はほとんどない                             | 先行投資は大きな便益をもたらす可能性あり   |
| 世界の主要国の排出量規制からもたらされる国際的な波及効果とリーケージ問題 | 非参加国での経済代替効果により, 波及効果は一般にマイナス (リーケージ問題あり)       | よりクリーンな技術の国際的な普及により, 波及効果はプラスと思われる (リーケージ問題なし)   |

出所: Grubb, Koehler and Anderson (2002)

その前に留意してほしいのは、この技術進歩のプロセスにおける議論は、主に欧米の学派間でなされているものであり、政府（と政府が実施する規制）と市場（と規制を受ける側の民間企業）の役割を明確に分けるという欧米の傾向を反映しているということである。したがって、日本のように、欧米と比べ政府・産業界間がより親密で話し合いの余地があるアジアの国においては、より統合的なアプローチのほうが受け入れやすいということもありうる。

## 2.2 実証的証拠と学習曲線

前述の通り、技術進歩に関する研究開発主導か市場主導かの議論は新しいものではなく、何十年も前から続いている。しかしながら、エネルギー部門ではこれら議論の展開が非常にはっきりとしている。というのは、主流をなす伝統的な世界規模のエネルギーシステムモデルは技術進歩を外生

変数としており、このようなモデルでは将来の技術のコストは GHG 排出削減量や炭素の価格には依存せず独立している。これは研究開発主導論に相当し、市場をベースとした技術革新議論とは対照的である。

図 4 は風力発電の例である。デンマークでは、年率 25 % 程度で風力発電市場が拡大していく中、発電コストが低下している。まずデンマーク国内で下がり、その後国外でもコストの低減が実現した。1990 年代を通じてコストは大体半分にまでなり、今ではヨーロッパの大部分で風力は従来の発電所とわたりあえるレベルになっているようである。この技術は劇的に改善していったが、それはこの産業の大幅な規模の拡大と関係がある。

学習プロセスを通じて技術の普及とコストの低減には何らかの関係があることを示す実証研究はいくつもある。図 5 では様々な発電技術の学習曲線が描かれている。学習効果は市場の成熟化とともに低くなるが、初期の商用化、技術の普及段階においては、生産量が倍増するとコストは 10 - 25 % 低下している (McDonald and Schrattenhozer 1999; IEA 2000)。このことから、技術革新とは複雑なシステムから産み出されるものであり、技術革新における各段階でのフィードバックや市場での経験から学習する能力が決定的に重要であると言える。

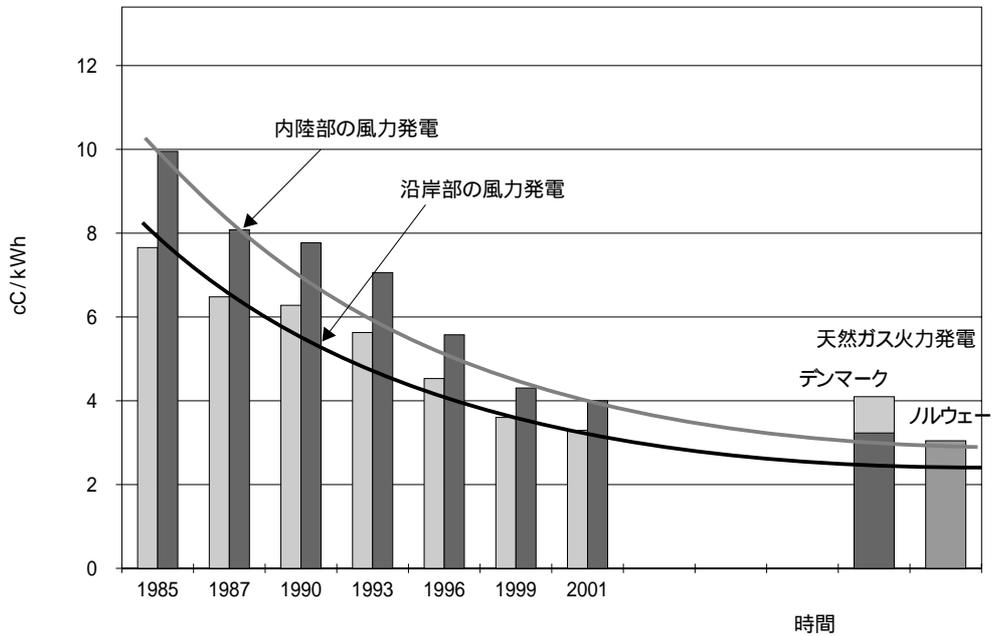
このような学習曲線は工学技術系の分析には長年用いられてきたが、大規模なエネルギーシステムの分析に用いられることには反対意見も多い。それは以下のような理由からである。まず因果関係が不明瞭であるということ。すなわち、市場のシェア拡大がコスト低減をもたらすのか、それともその逆であるのかが不明であるということである。第二に時間をどのように考えるかである。つまり、時間さえ経てば学習し、コストが低下するのかどうか明白ではないという点である。これらの議論は注目に値するとはいえ、規模と経験によって、大体どのような技術においてもコスト低下をもたらされるといういわば常識的事実を曲げることはできない。図 5 から規模とコスト低下の程度を知ることができるが、この意味するところは大変大きい。

### 2.3 技術コストの予測

技術コストを予測することは不確実性を伴うため困難であるが、エンジニアリング評価と経験曲線(学習曲線)のデータから、興味深い結果が得られる。インペリアルカレッジの ICCEPT (Imperial College Centre for Energy Policy and Technology) グループでは、イギリス政府の技術評価ユニット (Performance Intelligence Unit) の委託を受け技術コストの予測について研究を行ってきた。結果を表 4 (発電) と表 5 (液体燃料技術) に示す。

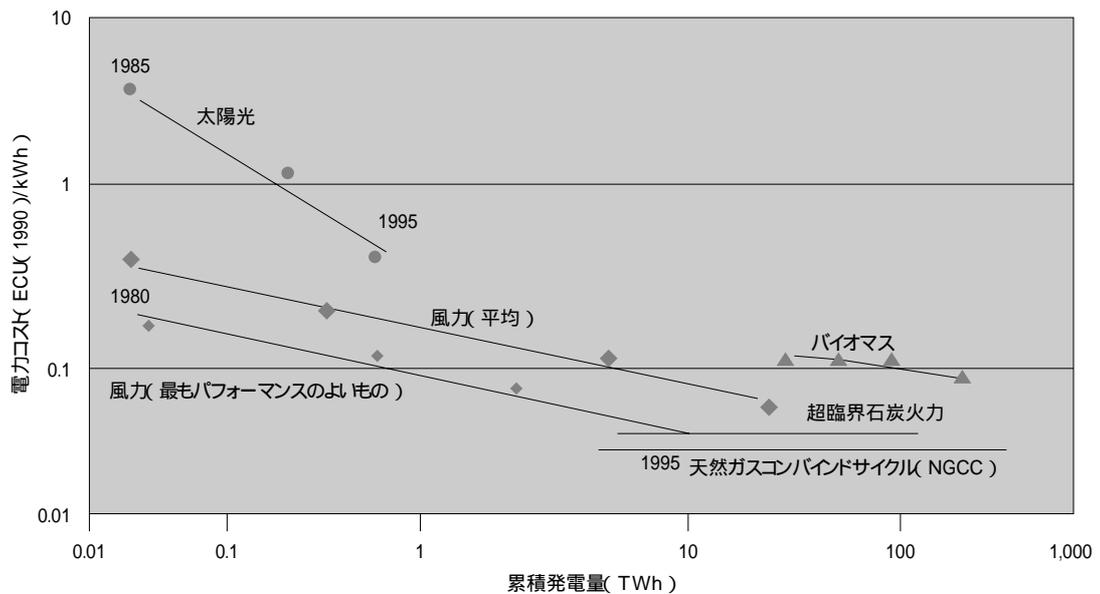
まず表 4 であるが、最も注目すべきは、中期におけるポテンシャルコストが 5 - 7 セント/kW の“非常に低炭素 (very low carbon)” のオプションが多様であることである。ここには炭素の回収・貯留、原子力、最新式バイオマス、洋上風力が該当する。天然ガスと陸上風力はおそらくこれらよりもコストが低い。一方、太陽光発電は 1kW 当たりではコスト高だが、小規模でも可能であるので、

図4 デンマークにおける風力エネルギーコストの推移



注：右の2つはそれぞれデンマークとノルウェーにおける新しい天然ガス火力発電（コンバインドサイクルガスタービン：CCGT）のコストを示す。コストには均等化した投資コスト，燃料コスト，操業・管理コストが含まれる。デンマークの2色の棒グラフは CCGT の操業時間を年間 4000 から 6000 時間の幅で示すものである。  
 出所：Morthurst (2005)

図5 様々なエネルギー技術の学習曲線（実績）



出所: McDonald and Schratzenholzer (1999)

表 4 発電技術の現在及び中期予測コスト

| 技 術   | 現在のコスト<br>(cents/kWh) | 中期予測                            | 備 考   |
|---|-----------------------|---------------------------------|---|
| <b>現行の化石燃料発電所</b>   |                       |                                 |   |
| 天然ガス CCGT*<br>石炭<br><br>*Combined Cycle Gas Turbine :<br>コンバインドサイクルガスタービン                         | 3-4<br>3.5-4.5        | 燃料価格及び炭素<br>の排出制限/価格<br>システムによる | \$10-20/tCO <sub>2</sub> の炭素 価格<br>(EU の排出権取引で一般<br>に予測されている価格) だ<br>と, CCGT の発電コスト<br>を約 0.6-1.2c./kWh 引き上<br>げ, 石炭の発電コストを 1.2-<br>2.4c./kWh 引き上げる |
| <b>非常に低炭素な電力技術</b>  |                       |                                 |   |
| 炭素回収・貯留<br>天然ガスとの組み合わせ<br>石炭 IGCC*との組み合わせ<br>*Integrated Gasification<br>Combined Cycle : ガス化複合発電 | NA<br>NA              | 4-6<br>5-8                      | 技術は確立しているが, ある<br>程度大きな規模では試用され<br>ていない   |
| 原子力   | 5-7                   | 4-8                             | -コストは投資に際しての利率<br>や建設期間によって異なる<br>-学習効果は低い  |
| バイオマス<br>石炭と共に燃焼<br>最新式バイオマス (電力)<br>CHP (熱電併給)   | 2.5-5<br>5-15<br>6-15 | 2.5-5<br>5-9<br>5-12            | -コストは原料になるものや転<br>換設備によって異なる<br>-農場や森林からの廃棄物はエ<br>ネルギー作物よりも安い   |
| 風力<br>陸上<br>洋上  | 5-8<br>9-12           | 2-4<br>3-8                      | -場所によってコストのばらつ<br>きがある<br>-陸上については学習曲線や良<br>質な技術データが急速に整備<br>されてきたが, 洋上に関して<br>はデータ整備が十分とはいえ<br>ない  |
| 潮流/波力   | 13-20                 | < 15                            | 技術の未熟性により, パラメ<br>トリックモデル (parametric<br>models) からの推定  |
| 配電網完備の太陽光発電<br>1000 kWh/m <sup>2</sup> /年 (イギリス)<br>2500 kWh/m <sup>2</sup> /年 (アフリカ, 南<br>アジア)   | 50-80<br>20-40        | 15-25<br>5-15                   | -高い成長性と学習効果の結果<br>コスト低下<br>-最終消費地に近いほど付加価<br>値が高い   |

注：この表は低炭素発電技術の発電コストと中期（一般には 2020 から 2025 年）コストの予測を示す。コストは全て 2004 年現在値に換算し、購買力平価で調整している。1 ポンド=1.5 ドルで算出。コスト予測の方法論はそれぞれ異なる。太陽光発電のコストは相殺コスト（ファサード設置のために移送された建築素材等）を考慮していない。出所：この表は R.Gross, A.Bauen and M.Grubb, 'Synthesis of energy technology medium-term cost projections: a technical note', ICCEPT, [www.iccept.ac.uk](http://www.iccept.ac.uk) における研究・分析の結果をまとめたものである。この研究はイギリスエネルギー白書の一部として発行された分析及びレビューであり、またイギリス政府技術評価ユニットの先駆的な分析でもある。

卸売り価格ではなく小売価格に関しては競争力があるといえる。これらのオプションはどれも既存の技術で可能であり、急激な技術革新というのは発電部門では必ずしも必要はない。また、経験曲

線をモデルに組み込んだいくつかの研究では“非常に低炭素”のオプションは将来これ以上にコストが高くなることはないとしている。このエネルギー源ポートフォリオから何を選択するかは地域によって異なるであろう。また、(貯留技術と配電管理技術の向上と合わせて)その組み合わせは多様であるので、多くの再生可能エネルギーの弱点とも言うべき断続性(訳者注:発電形態によっては常に一定の電力を供給することが困難であること)は大きな問題とはならない。もし低炭素エネルギー関連産業がある程度の規模にまで拡大すれば、今後数十年で非常に低炭素な電力システムを構築していくことは十分に可能である。

他方、運輸部門の状況はより複雑である。大気中濃度の安定化には、燃料が採掘されて自動車に使われるまでのCO<sub>2</sub>排出量を究極的にほぼ0に等しくすることが必要である。主なオプションとして挙げられるのがバイオ燃料、電気、水素であるが、このうち電気と水素はCO<sub>2</sub>の排出量が非常に低いエネルギー源から発電・製造される場合に限られる。

様々な種類のバイオ燃料のコストを表5に示す。明らかに、在来型の石油資源の生産にコスト面では太刀打ちできない(石油生産は遠隔で生産が容易でない土地でも1バレルあたり10ドル強である)。しかし2003年以降の石油取引価格を考えると、石油とわたりあえるようになりうる燃料オプションが現われてきそうである。ブラジルでは規模拡大によるコスト低減によってエタノールが1バレル30ドルの石油に対して競争力を持ってきている。また、セルロース技術もエタノールと同様のコストで生産できるかもしれない。一方で、穀物からのエタノール、菜種のディーゼルは依然として2倍ほどのコストにとどまるだろうと予想されている(表5)。

表5 バイオ燃料の現在のコストと2020年の予測

| 技 術   | 現在のコスト<br>(\$cents/litre ガソリン換算) | 2020年予測<br>(cents/litre ガソリン換算) |
|---|----------------------------------|---------------------------------|
| ガソリン・(ディーゼル)のコスト<br>原油価格を約 \$50/barrel (FOB Gulf<br>cost) とする | 35 (37)                          | 石油供給の状況による                      |
| エタノール (サトウキビ) (ブラジル)  | 25-35                            | 22-31                           |
| エタノール (トウモロコシ) (アメリカ)   | 40-60                            | 37-56                           |
| エタノール (穀物) (EU)   | 50-80                            | 40-65                           |
| エタノール (セルロース作物)   | 50-90                            | 27-67                           |
| バイオディーゼル (菜種) (イギリス)  | 99-165                           |                                 |
| F-T ディーゼル (雑木林) (イギリス)  |                                  | 53-89                           |

出所:表4参照

ハイブリッド自動車はCO<sub>2</sub>排出量を削減できるが、これは動力となる電気がCCGTあるいは低炭素の燃料で発電される場合に限られる。燃料電池自動車については、炭素排出のない電力で水素を製造するのはコスト高である。バイオ燃料、低炭素電力、低炭素水素は、炭素排出の少ない運輸

システムを構築するうえで長期においては共存できるだろうが、それぞれのコストと普及するまでの道のりを考えると、上記の通りバイオ燃料と水素は低炭素電力よりもコストがかかり、より複雑なものとなるだろう。

運輸部門における燃料転換は、石油の資源量と燃料供給のセキュリティの観点からも必要であると言える。温暖化問題が100年単位の問題なのに対して、地球規模の石油生産は比較的近い将来ピークに達する。在来型石油資源の推定残余資源量を全て燃焼したとしても、それは大気中のCO<sub>2</sub>濃度が500ppm（産業革命以前の2倍）に到達するCO<sub>2</sub>排出量の4分の1を占めるのみである。

#### 2.4 世界のエネルギーシステム

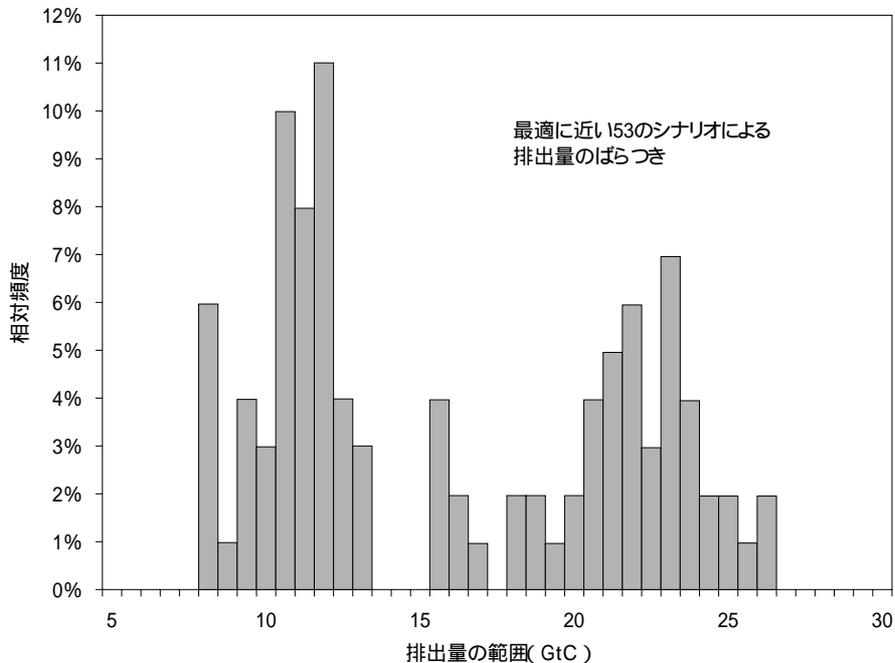
これまでの議論から、温暖化問題とエネルギー供給問題は統合的、長期的、整合的に講じていくことが重要であることがわかる。

技術の学習効果（learning by doing）を組み入れたモデルによると、同一コストをかけた場合、それに対応する排出量の範囲は非常に広い。図6はIIASA（訳注：International Institute for Applied System Analysis:本部オーストリア）の世界のエネルギーシステムの研究による2100年までの予想排出量（CO<sub>2</sub>）の確率分布である（Gritzevski and Nakicenovic 2002）。特筆すべきは、同程度のエネルギーシステムコストにおける長期の排出量の確率が双峰分布をすることである。この中で、高炭素の石炭・合成燃料に基づくエネルギーシステムを通じた学習効果を示すものもあれば、天然ガス・再生可能エネルギー・水素をベースとしたエネルギーシステムを示すものもある。将来どのエネルギーシステムを選択していくとしても、莫大な投資と技術の上での学習が必要だ。炭素集約的なエネルギーシステムが低コストで済むと推論することはできない。それは低炭素のエネルギーシステムと炭素集約的なそれとは、全く異なった技術、システム、エネルギー源を必要とするからである。

他の研究でも同様の結果が出ている。Papanathsiou and Anderson（2002）は、再生可能エネルギー集約的なシステムの純コストの確率密度を計算し、純コストがゼロの点を中心に幅広く分布するという結果を得た。言い換えると、学習効果の度合いが不確実ならば、再生可能エネルギーを中心としたエネルギーシステムは炭素集約的なエネルギーシステムよりも安いか高いかのどちらかで、それは学習係数（learning parameter）に依存し、再生可能エネルギーシステムがいつもより高価になるとする根拠はない。

政策サイドからはどうであろうか。石油代替エネルギー源への投資は現在、高炭素燃料（重油、タールサンド、オイルシェール、その他石炭由来の燃料）に多く向けられている。これを低炭素のエネルギーシステムに振り向けられるようにしなければならない。したがって、世界のエネルギーシステムを考える際、いかに低炭素のエネルギーシステムの技術を引き出していくかが政策上の課題となる。

図 6 IIASA による分析結果、不確実性下の技術革新と世界のエネルギーシステム：53 の最小コストシナリオにおける 2100 年の GHG 排出量



注：グラフは今世紀末における世界規模の炭素排出予測の相対的な度数分布を示し、53 のシナリオに対応するものである。これらのシナリオにおけるそれぞれのエネルギーシステムの総コスト（割引現在価値に直したもの）については、53 のうちの最小コストとその他のシナリオのコストの差は最小のもの 1% 以内である。（訳注：つまり最小コストが 100 億ドルであれば、コストが 101 億ドル以下の全てのシナリオケース（これが同研究によると 53 例あった）が上図に反映されている）。不確実な学習率の下での学習効果を含むモデルで算出された。これら最小コストシナリオは、高炭素（石炭ベースの学習効果が主）あるいは低炭素のどちらかであって、その中間には分布はしないことが分かる。

出所：Gritsevski and Nakicenovic (2002)

### 3. エネルギー・環境技術の発展過程と政策

#### 3.1 総合的な視点：技術革新の流れ

上述の問題を考えるにあたって、以下の分析は複雑な現実をうまく描写していると思う。革新的技術の開発は明らかに必要であるが、急進的で、全く新しい突破口としての技術は必ずしも必要というわけではない。同時に、低炭素技術の開発は政府の関わりなしでは難しいと考えられる。低炭素技術を開発し、普及させていくための投資は企業にとっては大きなリスクであり、それなりのインセンティブがなければこのようなリスクをあえて取ることはしないと思われるからである。このような文脈から、政策に関して何が言えるであろうか。

まず議論の出発点として、歴史に学び、技術政策は決して簡単ではないということを認識すべき

であろう。Fri (2003) に引用されているように、一般に技術開発に多くの資源を投入することで、社会問題を何もかも解決しようという傾向がある。しかし、その熱意に拘わらず、うまくいっても結果は必ずしも成功とはいえない。<sup>(3)</sup>したがって、技術革新のプロセスと潜在的な政策の役割を理解することが是非とも必要である。

第一に、「研究開発主導」と「市場主導」の間の論争は、技術革新は現実問題としてこの両方の観点を内包する複雑な現象である、ということを確認することで終止符が打たなければならない。技術者が R&Dこそ最重要だと主張する一方、シュンペーター以降の経済学者は技術革新を3つの要因（発明 invention, 革新 innovation, 普及 diffusion）に分けて分析している。しかし、これさえも不十分である。「D」（development：開発, demonstration：実証, diffusion：普及など）をいくつか追加することで技術革新を分析する傾向があるが、これでも様々な段階における実質的な変化を十分に説明することはできない。もっと詳細を見てみると、市場経済において技術革新は少なくとも6つの段階から成ることが分かる（図7(a)参照）。その6段階は以下である。

1. 基礎 R&D
2. 当該技術に特化した研究、開発、実証（以下 RD&D）
3. 市場における実証：潜在的購入者・消費者に当該技術が実際に機能することを示し、性能、実現可能性、潜在市場を検証する。
4. 商用化：既存の企業が当該技術を採用するか、当該技術関連の企業を新たに設立する。
5. 市場の集積：技術利用規模拡大、往々にしてニッチ市場、保護された市場での集積を通じて実現する。
6. 大規模な普及

このような技術革新の連鎖は必ずしも線形ではない（例えば大学からスピンアウトした企業は市場における実証を行うために設立されるということもありうる）。また、技術革新の進行に際して絶え間なくフィードバックが得られる。各段階で技術の改善とコスト低減がもたらされるのは言うまでもない。しかし技術革新に対する障壁や革新の原動力となるものは段階を通じて変化する。「研究開発主導」要因は初期の研究段階で支配的で、その後技術が進化するにしたがって市場主導要因が強くなる。

この枠組みで考えてみると、研究開発主導・市場主導に二分する論議の誤りが明らかになる。実際には、「研究開発主導」議論は初期段階の R&D に有効であり、「市場主導」はその後、技術が実用化に近い段階になって当てはまるのである。財政・公共政策の視点から、技術革新の連鎖を3つの要因に簡約すると大変分かりやすい（図7(b)）。1つの極は、新技術の RD&D 段階であり、こ

---

(3) 合成燃料、増殖型原子炉、核融合、多くの再生可能エネルギー、燃料電池がこの傾向を裏付けている。これらの大部分においては、財的資源をつぎ込んだ上での失敗か、そこまででなくとも、限られた市場における「成功」に終わる（Fri 2003）。

こでの主な問題は、公的支援のもとでの RD&D の財源とその運営に関するものである。一方その対極での問題は、民間の出資者への経済的見返りを左右しうる政策に関するものである。その中間段階では公的支援から民間資金への移転が課題となる。

技術革新に関する文献は他の重要な要素も指摘している。技術革新は前述のように、複雑なシステムの産物で、そこでは技術革新の各段階からのフィードバックと市場での経験から学習する能力が必要不可欠である (Shelton and Perlack 1996)。また、主な技術革新は、それを支えるような他の技術や制度の進化を伴う。同時に、これらの要因は既存技術を好み (“lock-in” 効果)、新技術の参入を妨げようとする (“lock-out” 効果) 傾向がある (詳細は Sanden and Azar 2004)。これらの点を考慮すると図 7 に示した枠組みは非常に単純化されている。これは技術革新についての「中程度に複雑な」アプローチと考えることが出来る。つまり、鍵となる特徴を捉えているという意味で十分複雑であると同時に、中心的な政策問題を論じる際の有用性の観点からは適度にシンプルであると言える。

### 3.2 エネルギー部門の技術革新

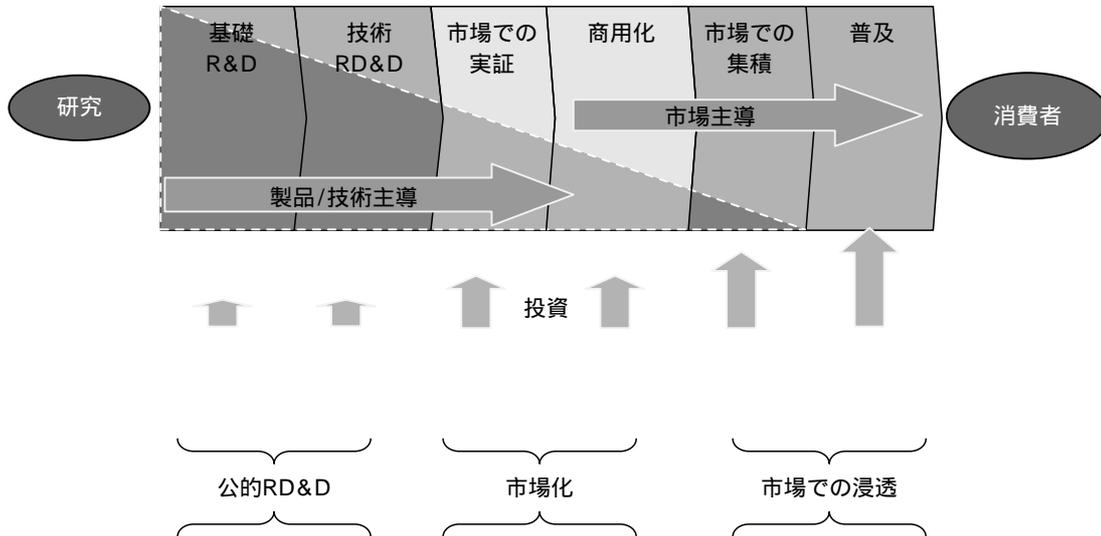
技術革新のこれらの基本的な原則の中には、実際には部門によって大きく異なった形で現れるものもある。例えば IT や製薬部門では、技術開発の度合いが非常に高く、売上額の 10-20 % が技術開発の投資に向けられている (Neuhoff 2005)。これは発電部門とは大きく異なる。発電部門では同じ基礎技術が 100 年近くも使用されており、エネルギー産業の民営化とともに RD&D も急激に減少し、現在では売上の 0.4 % にも満たない (Margolis and Kammen 1999)。

発電部門がこのように「技術開発非集約的」である理由は何であろうか。莫大なエネルギーを扱う業種であるということは、長期に亘る莫大な資本投資を必要とし、それは必然的にリスクを高め、民間資金を寄せ付けなくなる原因となる。技術革新のそれぞれの段階に 10 年は要し、普及するにも時間がかかる。おそらく、もっと根本にあるのは、R&D 集約的な業種 (IT、製薬) は競争が非常に激しく、製品の差別化 (よりよいパソコン、よりよい携帯電話、よりよい薬) が必須である一方で、電力産業において技術革新とは基本的に効率性の向上と価格低減のためのものという事実である。これは革新的技術の開発への誘因としては弱い。また、IT 関連の新製品のように、高価格プレミアムを付けるような、消費者の想像力をとらえ大規模な市場を支配する新製品と比べると、電力のような価格をベースとした競争では、リスクに見合うリターンが得られるとは期待できない。

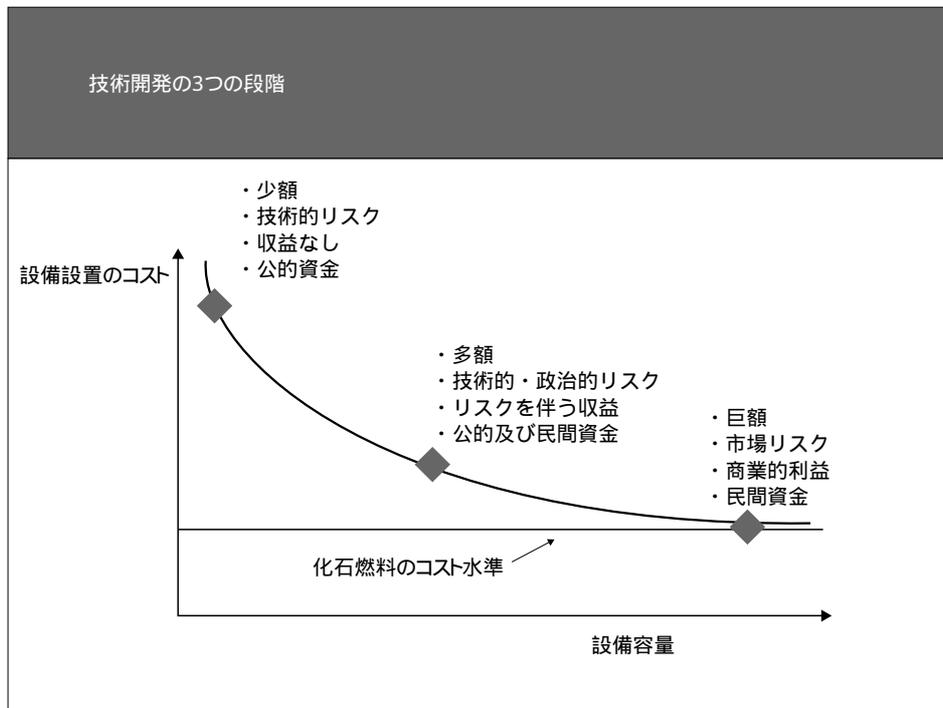
こうした問題は、発電部門及び建物部門において顕著に見られる点に留意が必要である。石油業界はこれらの業種よりも技術開発が多く見られる。莫大なレントがあるので、技術開発にかかるリスクをとることが可能なのである。一方、たとえ燃費が競争上あまり注目されなくとも、自動車は製品として競争が激しいので技術革新も活発である。残念ながら、現行の石油業界の開発投資は、その多くが高炭素技術に振り向けられている。そしてそれらの燃料を用いた発電部門と建物部門の

図7 技術革新の連鎖

(a) 技術革新の連鎖における主なステップ



(b) 公共政策の観点から見た主な3段階



エネルギー消費こそ世界の CO<sub>2</sub> 排出の大部分を占める。

したがって、実は温暖化対策の技術政策は、もっとも革新的ではない産業のひとつに急激な技術革新を求めているのである。低炭素技術開発のインセンティブの強弱は、炭素コストを内部化するという政府の不確実な政策によって決まるが、これも誘因としては弱い。

公的な R&D は民間の技術革新投資を十分に代替する力はない。世界の公共部門のエネルギー関連 RD&D 支出は 1980 年代半ば以降半減した (Margolis and Kammen 1999)。これはオイルショックを契機とした省エネへの投資が一段落したからだけではなく、いくつかの大規模なエネルギー技術への巨額投資が実用化の段階に到達せずに終わってしまったことにある (Cohen and Noll 1991)。新技術が公的な支援を受ける実証段階から、ビジネスとして渡り合える土台を築くまでに、内因的な障害が存在するのである。これは技術革新の連鎖の途中段階にある「技術の死の谷 (technology valley of death)」と呼ばれ、既存の文献でも多く研究されてきた (例えば Murphy and Edwards 2003)。

公的 RD&D はその案件が少ないこと、また商業として有効利用できる結果に十分つながらないという点でも「技術の死の谷」を埋められずにいる。その結果、民間企業と公共部門の異なるニーズのせいで、革新的技術の開発は遅々として進まず、エネルギー技術は失敗に終わってしまう (Murphy and Edwards 2003; Foxon 2003)。

### 3.3 技術革新の格差を縮めるための枠組み

低炭素技術の開発を促進するための政策を考える上で、前節のような視点は非常に有用である。つまり、政府は技術革新の連鎖を通じて重要な役割を果たすが、その役割は技術革新の経路 (path) と共に急速に変化していく。また、部門によって政府が関わるべき程度も大きく異なる。

まず、政府は基礎・応用技術 R&D、実証のための資金を捻出し、だれでもアクセスできるアイデアの土台をつくる。

その一方で、政府は出資者が報われるような基礎的法的枠組み、とりわけ、製品特許の規定をしっかりと整備する必要がある。このような製品特許があれば、ユニークな新製品の開発に投資をする企業を、一定期間競争相手のコピーから守ることができる。市場サイドの政策は、技術開発企業にそれに応じた報酬を与えることに加え、最良の技術をふるいわけ、基礎を成す研究活動に指針を与えることが重要である (Loiter and Norberg-Bohm 1999<sup>(4)</sup>)。

排出量の削減といった「公共財」を対象とする技術革新の場合、政府が炭素税や排出権取引を用いて低炭素技術の市場価値を上げる規制を採らない限り、「市場重視」議論が現実には当てはまること

---

(4) 風力エネルギーのために弱い需要サイド (市場サイド) の政策を導入することは、技術革新のための研究プログラムにあてられた公的資金を無駄に支出するリスクがある。こうしたプログラムが、プログラムの結果をテストしたり、或いは将来の指針を示したりするという市場の便益を何ももたらさない場合は、こういった技術が成功する見込みはあまりない (Loiter and Norberg-Bohm 1999 p.85)。

はない。そうした排出抑制の規制は、低炭素技術の普及を下支えする市場ベースのインセンティブとなる。したがって究極的には、当該技術の方向から利益を得られるというシグナルを送る。

多くの産業部門にとっては、上記のような公的 R&D、特許の整備といった公共政策で十分である。例えば製薬業界ではよりよい医薬という「公共財」は自動的に国の保健関係機関、民間の医療機関による大規模な購入、あるいは個人の直接購入によって自動的に市場で報酬が発生する。そしてそれぞれ化学的に特異な医薬に特許権を与えることで、製造者に対して強力な保護となる。したがって、「市場」の影響力は技術革新の連鎖の奥まで届く。IT 業界においても、公的資金による基礎的な研究を強固な土台としたものであれば、製品の差別化（よりよい IT 関連製品）は製薬業界と同様に市場での報酬と特許権による保護が得られる。

しかし、エネルギー産業（特に電気・ガスといった公益事業と最終消費部門）の技術革新の事情は、上述の医薬品や IT 部門のそれとは異なる。技術革新の連鎖の両端における伝統的な政策では、中間段階にある「技術の死の谷」に対応できないのである。製品の差別化が市場を動かす原動力ではないので、公的 R&D はエネルギー関連の新技術の市場への浸透を促すことはできず、市場主導の力は弱い。排出量抑制も、信頼性のある長期的な対策として十分ではない。というのも、企業がこれらの排出量抑制政策に従おうとしても、株主からは懐疑的な声があがることが予想され、これは多くの企業にとって大きなリスクとなるからである。したがって公的 R&D は市場への浸透を促すことはできず、市場主導の力も弱い。技術・経済的リスクに加えて、（実体があろうとなかろうと）政治的なリスクがさらに新規参入者を退けてしまう。公的 R&D あるいは炭素の価格付けや排出権取引のどちらも、温暖化対策に必要な広範囲かつ長期の技術革新を促すことはできない。

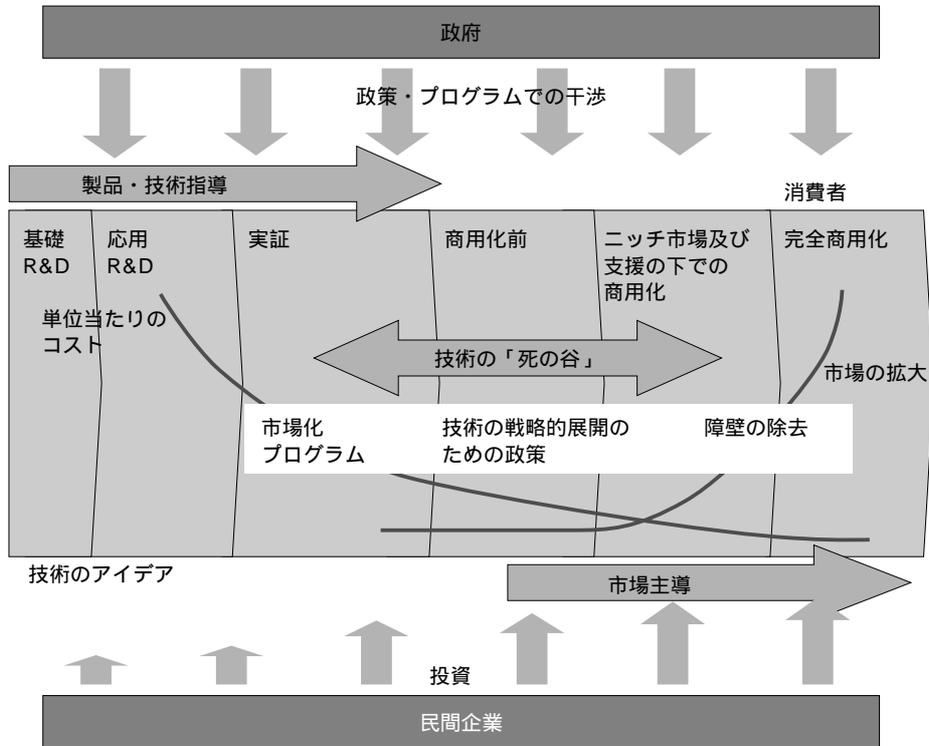
つまり温暖化のような巨大で長期的な問題の場合、排出量を抑制するには、技術革新の連鎖の各段階において、R&D や技術投資を促すためのあらゆる支援を組み合わせた対策をとらなくてはならない。この見解は広く認知されつつある（IEA 2003）。次節ではこれらの点を整理するとともに掘り下げて考察する。

### 3.4 技術革新の格差を縮めるための政策とその分類

技術革新の連鎖の中で技術をスムーズに推し進めていくには、「技術の死の谷」の上に有効に橋をかけるような政策が必要である。そのような政策がうまく機能すれば、新技術は大規模に普及する段階に入る。図 8 は「外部性の内部化」の必要性とともに、そのような政策を 3 つに分類している。まず、市場化プログラム（Market Engagement programmes）によって公的資金の R&D による「試用技術」から民間企業による事業にし、新技術の戦略的展開のための政策（Strategic Deployment policies）によって大規模の市場を形成し、新技術のコストを低減する。そして障壁の撤廃（Barrier Removal）によって、既存技術を有利に扱う規制・制度の撤廃を通じて公平な競争条件をつくる。

加えて、外部性の内部化政策は技術革新の連鎖の多くの段階において異なった効果を発揮するで

図8 技術革新の連鎖において橋渡しの役割をする様々な取り組み



あろう。例えば、連鎖の最終段階における排出権取引や炭素税は既存の CO<sub>2</sub> を多く排出する技術からの環境損害を内部化し、新技術（代替技術）の経済性を改善させる。

一方、技術革新プロセスの早い段階での学習効果（“learning-by-doing”）は、経済的視点から考えると、習得された知識が将来の技術開発者に活用されるという点で外部経済（外部便益）である。また、将来の低炭素社会にむけてのインフラ整備のための長期投資は、「内部化」のための現行政策のもう1つの側面であるが、そのような投資から分かることは、内部化への努力のウェイトは、投資対象となる新技術オプションの寿命や、その結果出現する技術によって変わるということである。地球温暖化のような、世界規模でかつ長期にわたる問題にとって、GHG 低排出技術への投資の間接便益は直接便益を大きく上回ることもありうる。間接便益とは、知識の創造、インフラや技術オプションのもたらす効果で、低排出技術への投資が社会にもたらす便益のことである。筆者は10年ほど前に、極めて簡素化された最適制御モデルをもとに、これら間接便益は排出制限によって「回避された損害」の額の少なくとも7倍にもなりうると論じた（Grubb 1995）。

全体として、このことは技術革新システムに関する様々な研究結果と矛盾することはない。これまでの研究結果が指摘することは、技術革新はその目標と無関係なものではないということである。つまり、革新的技術の開発を促進するための手法は、長期の環境目標のための手段と全く別々に展

開していくことはなく、低炭素エネルギーシステムの長期的ビジョンから「逆算 (backcasting)」することによって明らかになる必要な政策と密接に連動しているものなのである。

技術革新の連鎖（どのような場合でも前述のとおり線形な過程ではない）に従って最初の段階から手をつけるのではなく、連鎖のどちら側から取り組んでも良く、その上でギャップがあればそれを埋めるとというのが、政策のより理想的な講じ方である。ここではまず市場化と障壁撤廃について簡単に述べ、そして戦略的展開について詳しく議論していく。

市場化プログラムは、技術が公的な領域から民間に移行することを促進する。この中には以下のようなものがある。よく知られているものもあれば発展段階のものもある。

- ・技術のインキュベーター：多くは大学発ベンチャーを育てることに特化した政府支援の組織として既によく知られている。
- ・市場化促進プログラム：新技術が実際に使用される状況で多くのフィールドテストをし、「実地」でのパフォーマンス・データを提供する。この過程を通じて技術が改善され、投資家や潜在的消費者に技術と関連企業のパフォーマンスに対する自信を与える。これはソフトウェア産業における「ベータテスト (beta testing)」に似ており、最近ではカーボントラストの超小型 CHP 及び計測技術に対する技術革新促進プログラムがよい例として挙げられる（訳注：beta testing とは、開発初期段階の新製品を主に企業内でテスト (alpha testing) する次の段階のテストである。企業外で実施し、潜在的消費者に対して実際のハードウェアで実際の利用法でテストできる。また、カーボントラストは筆者が政策責任者を務める、イギリス政府出資の独立した組織で、低炭素経済への移行の促進を目的とし、革新技術の開発のためのプログラムの提供及び既存の技術の導入・展開に対する同国企業への支援を行っている）。

もう1つの観点は障壁の撤廃である。既存技術をベースに成り立っている既存の市場は新技術にとって障害となっているケースが多い。既存技術を優遇するような補助金、既存勢力のロビー活動、事実上差別的に作用する規制などにより、既存の市場参加者は外部費用のすべてを負担することを免れている。例えば数多くの短期取引市場で、風力が安定供給性に欠けるという特性の故に、電力自由化が風力発電に不利に働いてしまう。障壁の撤廃に関しては財によって事情は大きく異なるのでここではこれ以上立ち入って議論しない（風力のような供給に断続性のある再生可能エネルギー源に対する市場障壁については Neuhoff 2005 を参照）。

エネルギー需要側の新技術は一般に費用効果的であるので、市場化プログラムと障壁撤廃の組み合わせは十分であると思われる。障壁の撤廃や補助金、技術開発を促す技術基準の設置のような手法を通じた市場への介入は直接的な純便益をもたらす可能性もある。これまでの「技術開発を促す」需要サイドの政策（日本のトップランナー方式もこれに当てはまる）を見てみると、そのほとんどが経済的に純便益をもたらしている。省エネルギー技術が供給サイドと比べて技術革新の可能性が少な

いという証拠はないが、これは現状が既存の技術のうち最良のものを採用していないということであり、多くの場合、これらの技術を設置するために必要とされる投資額はエネルギー供給技術ほど大きくもないし、まとめて必要であるわけでもない。したがってこのような場合、市場化プログラムで技術の実証と市場への適用を促進し、障壁撤廃で技術の普及を促進するという組み合わせで、技術革新の連鎖を十分つなげていくことができると思われる。

本稿が最も主張したい点は、低炭素のエネルギー供給技術は需要サイドの技術よりも問題が多いという点である。それは発電（エネルギー供給技術には）本質的に以下の特徴があるからである。

—長い時間規模

—複合的な政治的リスク（大規模な設備の設置は反発を招きやすく、排出するCO<sub>2</sub>の価格付けは非常にゆっくりと、少しずつしか進まない）

—非常に弱い市場の牽引力。同質の製品（電気）に対する価格の差別化がみられず、そして多くの場合政府が電力料金即ち利潤を規制しているからである。

発電技術は多くの場合大規模な投資が必要となる。このことを考えると、よほど勇気のある（あるいは無謀な）電力会社でなければ、売上の大部分を、数10年は収益を期待できないおそれのあるリスクな大規模事業に投資したりはしないだろう。そして利益があがるころには、政府の収益規制に縛られてしまうことも考えられる。

このような理由で、政府はますます技術革新の連鎖の中間部分をリンクさせる政策の重要性を考慮し、これらを推し進める方向に向かっている。次節ではこの問題を詳しく検討する。

### 3.5 新技術の戦略的展開：その手法と経済性

おそらく最も議論を呼ぶのは、技術は確立しており原則的には実用化が可能であるが、小規模であるために高コストにとどまっている技術をどうするかという点である。これに対しては新しい技術の大規模展開促進のため「新技術の戦略的展開」政策が必要である。関連産業を育成することで戦略的優位が得られ、コスト低減につながるの考えに基づく。このような政策が正当化される主たる理由は「経験曲線」が示すものであり第2節にまとめた通りである。

新技術を戦略的に展開するには、技術導入のインセンティブとなる規制を設ける必要がある。そうすることによって、そのような規制がなければ経済的には採算が合わない新技術について、学習効果や規模の経済から便益を得ることが可能になる。既述の橋渡しの役割をする3種類の政策のうち、新技術の戦略的展開については経済学者の間でもっとも意見の分かれるものとなるだろう。それは、このような戦略は一般的に（政府による財政支援のプログラムとは逆に）政府の直接的な干渉を伴い、伝統的な経済学には未だこれを正当化する理論的基礎がないからである。

新技術の戦略的展開の典型的な例は、再生可能エネルギー普及支援策である。具体的には以下の

ものがある。

- ・固定価格買取制度 (feed-in tariffs)：特に大陸ヨーロッパで導入されており，風力のような再生可能エネルギーからの電力に一定の（上乘せ）価格が支払われる。
- ・再生可能エネルギー使用義務 (renewable obligations)：北米では再生エネルギー使用割合基準 (portfolio standards) として知られており，電気事業者には一般的にはグリーン証書の取引システムを通じて，電力の一定割合を再生可能エネルギー源とするよう定める。
- ・その他技術あるいは燃料に関する規定：長年にわたり，自動車燃料として全てもしくは一部エタノール使用義務を課しているブラジルの例がある。

これらのアプローチのプラス面・マイナス面は Butler and Neuhoff (2005) で分析されている。

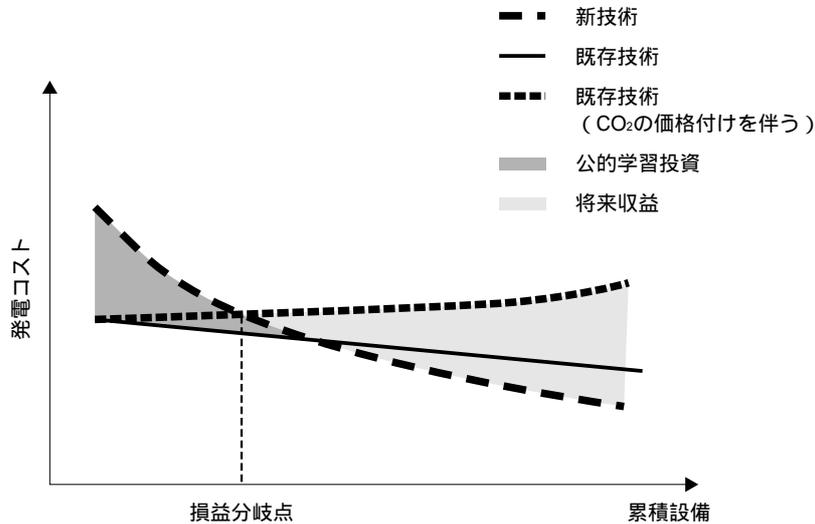
このような戦略によって，低炭素のエネルギー供給技術は，既存の高炭素代替技術と同じ程度までコストが低減されなければならない（既存技術のコストも今後下がるだろうが，その低下するスピードは新技術のそれよりも遅いだろう）。更に，炭素排出コストの内部化も徐々に進めていくべきである。そのようにして，初めて低炭素技術は利潤を生み出す（図9）。

ここでデンマークとブラジルの成功例に言及する。デンマークの風力発電とブラジルのバイオ燃料技術はかつて10年以上にもわたって政府からの支援を必要としていた。デンマークの補助金は総額13億ドルにもものぼったが，現在同国の風力発電業界は毎年その額以上の売上を誇っている（Carbon Trust 2003）。またブラジルに関しても，現在の石油の価格動向を見ると，近い将来これまでのバイオ燃料への投資が回収できるほど経済性が改善すると考えられる。

他のエネルギー供給技術にはより多くの学習投資が必要となるだろう。例えば総額数10億ドルにも上るRD&Dの結果，IGCC（IGCCは多くの場合，発電所の炭素回収・貯留技術の必要条件である）は5-75億ドルの補助金（金額はプログラムの規模等による）を必要としながらも小型施設の配備が可能になった（Rosenberg et al. 2004）。また学習曲線から考えると，太陽光発電は200-1000億ドルの投資があれば，多くの国において最終消費段階で大口電力供給と競合できるようになりうると考えられる。また，便益・費用比は前提条件が変われば大きく変わるが，たとえ炭素価格を内部化しなくても，この比率は高くとどまる可能性もある（Neuhoff 2005;van der Zwaan 2004）。全体的に，IEAの研究によると，今後30年の間に合計4000億ドルの学習投資がなされれば世界規模で低炭素電力システムを導入できるだろうと推定される（IEA 2002）。この数字は電力部門が予測した発電設備に必要とされる投資額の10分の1にも満たない。IEAのシナリオは高効率・低炭素であり，電力需要が減少するのでインフラ整備の必要性も下がる。したがって，同推定では総累積投資額が少なく算出されている。

一方，運輸部門に目を向けると，技術オプションの多くは初期段階でのこうした定量化はできない。しかし，バイオエネルギー開発の潜在的なコストは，OECD諸国の毎年2350億ポンドの農業

図9 新技術の戦略的展開にかかるコストともたらされる便益 (CO<sub>2</sub> 価格の上昇による潜在的な影響を含む)



注：濃いグレーの部分は新技術の展開のための補助金で学習コストの削減のために必要である。単位当たりの補助金は損益分岐点に到達するまで下がり続ける。その後新技術は既存技術よりも低コストで電力生産をする（既存技術のコストも下がるだろうが、既に開発された技術でかつ一定規模で普及しているの、コスト低下のスピードは一般的に遅い）。右側の薄いグレーの部分は潜在的便益（将来収益）。損益分岐点までの時間及び長期間での利益は環境面の損害を反映した政策の有無によって異なる。経済的観点から言うと、前渡しの補助金は、外部性の公共財である戦略的学習の便益を内部化する。

出所：Neuhoff（2005）

補助金と比べるとわずかに見えてしまう（OECD 2004）。一方、埋蔵量減少に直面して、石油供給を維持するためには2030年までに3兆ドルの投資が必要であると予測される。また、現在の投資状況では、高炭素資源の開発に向けられる割合が伸びている（IEA 2003c）。天然ガスや石炭起源のエネルギーシステムの開発にも同様程度の投資が必要であると予測され、IEAはエネルギー部門は炭素排出に制限があろうとなかろうと、今後30年で合わせて16兆ドルの投資が必要になるとしている。

第2節の結論のとおり、脱炭素社会への鍵となるのは、増加傾向にある補助金や最先端技術への投資を、高炭素ではなく低炭素技術のインフラや学習投資に振り向けることである。これを現実のものとするには、公的RD&D、CO<sub>2</sub>排出権取引制度とともに、技術の市場化、障壁撤廃、戦略的展開のための政策が必要である。

#### 4. 国際的戦略に関する所見

ここで国家間の技術協力に関して述べる。この議論で重要な論点の1つは、温暖化対策にはそもそもの程度の直接的な国際協力が必要か（あるいは、国際協力は各国の温暖化対策にプラスになるか）という点である。この問いに対して明確な答えはない。温暖化対策としての国際協力は様々な分野

における国際情勢に左右されるだろう。もし京都議定書の枠組みがうまく進んで、現在よりも多くの国が今後排出量の絶対値目標を受け入れるようなことがあれば、排出制限を約束するということが自体が各国にとって低炭素技術の促進政策を採るインセンティブになる。これはとりわけ技術革新連鎖の最後の普及段階に当てはまるだろう。確かにこのようなプロセスが進行すれば、大手の戦略的企業の低炭素技術への投資意欲は高まるだろう。排出権取引であろうが他の手法であろうが、将来低炭素技術へのインセンティブが強まることが予測できるからである。

逆に、もし京都議定書の枠組みがうまくいかなかった場合には、現実的な真の変革のために国際的な技術協力の必要性がますます高まってくるだろう。新技術を開発し技術革新連鎖における中間段階をスムーズにつなぐために、また低炭素エネルギー供給技術や高効率の需要側技術の大規模な普及へのインセンティブを創り出すために、国際協力は不可欠となる。

概してIEA（2003）の研究はこの点に関して「もっと多くの対策が可能である」と結論づけている。国際協力に関するオプションは役割ごとに内訳ができ、大まかに技術革新連鎖の初期、中期、後期に対応している。

#### 4.1 国家間のRD&Dプログラム

まず、国家間の公的RD&Dプログラムが挙げられる。これは技術革新連鎖の初期に対応する。低GHG排出のエネルギー技術や回収・貯留技術、適応技術への公的R&Dは潜在的な規模の経済性、各国の協調のもとでの技術の専門化、相互学習などが見込まれるので、国家間で協力すれば大変有益なものとなるだろう。

しかし、このような国際協力には課題もある。もし、政府が技術開発に対する支援を誰でもが応募できる形で募集したら、その資金を求めて、自分こそが革新的な技術のアイデアを持っていると主張する応募者が殺到するだろう。そして、そのような企業の中には、政府によるファンドがなくてもいずれ行っていたであろうことを、政府からの財政支援で行うこともありうる。これに対して、特に経済学者からの痛烈な批判が予想される。過去に政府の財政支援した技術の失敗例は数多くあり、その中には、社会学者が制度的欠陥（institutional capture）と呼ぶ現象が発生し、驚くほど多額の資金をつぎ込んだものもある。よく「政府は勝者を選別するのは不得手だが、敗者は政府に食いつくのがうまい（governments are bad at picking winners, but losers are good at picking governments）」と言うが、まさにそのとおりである。

公的R&Dにおける制度上の問題の中には、国家間の技術開発プログラムであるがゆえに、問題が増幅してしまうこともある。このようなプログラムにおいては、国家間の協力に際して、国家間競争（international rivalry）が避けられないという問題がつきまってくる。特に商業的な成功が見込まれるとき、各国政府は自国の産業や技術こそが国際的な支援を受けてほしいと願う一方、他国の技術に資金を援助することには消極的だろう。更に、技術が実用化に近づくと知的財産権の間

題が浮上する。そうすると、参加者は商用的に価値がある技術を他に模倣されないように隠しながら、共通の財源からの支援を求めるので、この問題は国家間の協力に逆行するものになりかねない。結果として、国際技術プログラムが容易に対象とできる技術は、核融合技術のように、将来実用化されるとは誰も期待などしないものになってしまう。国際協力のもとでの技術プログラムを実行するには、明確な判断基準ときちんとした説明責任のメカニズムに基づいた健全な運営が不可欠であり、プログラムの目標（目的、範囲、商用化に向けた道筋を含む対象期間など）を明確に認識しなくてはならない。例えば、基礎 R&D の戦略とメカニズム、他国の参加度合い、制度的形態やガバナンス、説明責任メカニズムの諸問題、といったことがらである。

これらの問題を議論する際、エネルギー及び国際的な環境分野での過去の経験と現在進行中のプログラムから多くを学ぶことができる。IEA は過去 30 年にわたって、OECD のエネルギー問題に関する取り組みをまとめてきた。これには具体的な技術についての「協力協定 (Collaborating Agreements)」を含み、数々の成功事例は IEA (1999) にまとめられている。これらの国家間の技術開発プログラムはまだ規模は小さいとはいえ、今や OECD 加盟国の枠を越え、多くの途上国も参加している。

大規模なプログラムには、機関として自立性を持ってしまうことになるかもしれないというリスクがある。つまり、このような技術開発プログラムが当初の期待通りの結果を出せないとき、プログラムを打ち切りたくても国家間のものだとそれが非常に困難になる。留意すべきは、このような RD&D プログラムは有用ではあるが万能薬ではなく、また、新技術のアイデアを大規模な産業にしていくまでには数々の難関があるが、国際協力がそれらの問題を解決するわけではないということである。

#### 4.2 国家間の官民パートナーシップ：革新的技術のインキュベーションとその促進に向けて

技術革新連鎖の中期に対応する国際協力の 2 番目のタイプとして、産業界を低炭素技術に積極的に関わらせようとする取り組みがある。国内における新技術の市場化のように、国際ベンチャーキャピタル市場から資金を調達できるようになるまで新しい技術を育成するため、あるいは数カ国での大規模な実地試験により新技術にかかるリスクを減らすために、国家間が協力して財政的な共同支援を行うというものである。

もし、上記のような国家間の財政支援において国家間競争上のジレンマが顕在化してしまうようなことがあれば、共同出資 (actual mutual funding) ではなく、行動への共同約束 (mutual commitment to actions) というアプローチはどうであろうか。例えばイギリスのカーボントラストでは、様々な国が、特に技術革新連鎖の中間段階において、それぞれ特定の技術分野を育成していくという足掛かり (stepping stones) 協定を提案している。国ごとに関心のある技術や比較優位のある技術が異なることは明らかである。例えば、アメリカは炭素貯留技術、イギリスは海洋再生可能エネルギー

技術、日本は多様な分野での省エネルギー技術について、率先して開発を進めたいとするだろう。

技術分野について協定を結び、その有効性を監視するというやり方にはいくつか問題点がある。協定が弱い形態であれば、国家間と見えるだけで実は各国がすでに実施している技術開発となんら変わらない場合もありうる。一方外交的な立場から見ると、このような協定は交渉決着の見込みが増す、という意味でプラスである。しかしながら、全体の規模からすると、このような協定がいったいどのくらい温暖化問題の解決に貢献できるのかは明らかではない。特に排出制限の代替案として用いられる場合、有効な解決策であるかどうかは不明確である。一方、こうした案は、排出制限への一助として、また、排出制限の将来枠組みへの準備として、国家間の議論の際により有望な手段の1つとして取り上げられるだろう。

#### 4.3 新技術の戦略的展開と障壁除去のための国際協定

3番目のタイプの国際協力は、技術革新連鎖の最終段階、つまり規模の拡大、大規模な学習効果、そして普及政策に関わるものである。既にこの段階に到達している技術として以下のものがあげられる。

- ・石炭・バイオマス発電の先進技術（ガス化など）：普及が進めば高効率・低排出につながり、また、CO<sub>2</sub>回収・貯留技術と両立性がある。
- ・省エネ型先端建築技術：既存の建設業界や賃貸市場など、市場に新技術に対する障壁が存在するもの。
- ・より先進的な一次再生可能エネルギー関連技術：特に太陽光発電。潜在的な規模の経済性が大きい。風力も、陸上の配備を進めるには地域ごとに固有の学習が必要だが、排出削減への貢献が非常に期待できる。また洋上風力については、関連産業での技術革新に大きな刺激を与えている。

技術規模及び設備設置・経済的持続性の必要性の諸点から、このような技術普及に関する国際協定は、例外を除けば、公的機関のみによる財政支援の範囲を超えるものとなる可能性がある。世界銀行・国連開発計画（UNDP）・国連環境計画（UNEP）の設立した地球環境ファシリティ（Global Environmental Facility）<sup>(5)</sup>や、世銀及びその他炭素関連基金がよい例であろう。これらは必ずしも正確には技術プログラムではないが、特定の分野（バイオマスや太陽光発電など）の技術開発促進に大きな功績を残してきた。特定の技術向けの基金（バイオエネルギー基金など）も最近出てきた。

しかしながら、新技術の戦略的展開の主な論点は国内の法制度である。国家間の協定は技術展開

---

(5) 世銀の炭素基金は京都議定書のCDMで商業的に採算がとれる排出削減クレジットを発生させるプロジェクトに対し資金支援をしている。このようなクレジットや排出枠の国際取引によってGHG排出削減のための新技術の開発・実用化に向けて資金を提供できる。従って、GHGの規制・取引制度はR&D資金をつくり、規制の誘因による技術革新への需要を創造する（Stewart and Wiener 2003）。

の具体的な目標、或いは展開を促進する特定の規制メカニズム（固定価格買取制度、RPS 制度）に焦点を当てる必要があるだろう。

このような国際協定の別の一面として、新技術が直面する障壁の撤廃に重点的に取り組むというものもある。化石燃料に有利に働く補助金などの障壁は把握するのは容易だが、撤廃するのは政治的に困難である（気候変動枠組み条約も含め、様々な場で補助金の廃止に向けて試みは行われてきた）。その他の障壁については捕捉が容易ではないが、例えば電力市場の細かい規制に関するものなどであろう。

途上国では先端技術の普及を阻害する障壁が更に多い（IPCC 2000）。この問題は温暖化問題の交渉でも国際的に最も注目を集める点である。京都議定書は気候変動枠組み条約よりも強い文言を使って、民間部門による環境技術への投資を促進するために、すべての国が投資環境を整えるべきであると唱えている。また、「技術移転に関する専門家グループ（Expert Group on Technology Transfer: EGTT）」が常設として組織された。障壁撤廃に関する国家間の協定は控えめではあるが、他の温暖化対策を補完する非常に有用な手法であり、他の手法と比べると、現在の温暖化交渉プロセスに難く取り入れられるだろう。

#### 4.4 国際協力オプションのまとめ

表 6 では本稿での分類に従ってこれまで述べてきたオプションをまとめた。温暖化の解決策としての国際的な技術協力オプションの詳細を明確に把握することは重要である。とりうるオプションは技術発展の段階や対応する温暖化問題の側面に合わせてさまざまである。表 6 に挙げた 9 つのオプションのそれぞれにはメリット、デメリットがあり、それぞれ詳細に検討していくことができる。

国家間の技術協力は重要で可能性のある領域ではあるが、温暖化問題の解決策として単に技術協力を主張するだけでは十分ではない。問題は、協定が技術革新連鎖のどの段階に対応するか、どのような手法が導入されるのか、どのような技術が利益となるかといったことや、協定の形態、政治的実現可能性、温暖化への究極的な影響である。それこそが低炭素技術について世界が直面する課題である。

表6 国家間の技術協力オプション

| オプション                       | 目的  |
|-----------------------------|---|
| <b>公的技術 RD&amp;D 協定</b>     |   |
| クリーンエネルギー R&D 基金            | 一国の公的資金では負担できないような高コストの技術に R&D 資金を提供する  |
| クリーンエネルギー実証基金               | 世界規模で導入できる技術であるが、知的財産権問題を避けるために経済利益が地域的に限定される技術の開発と実証を支援する  |
| <b>市場化のための基金と協定</b>         |   |
| クリーンエネルギーベンチャーキャピタル基金       | 温暖化関連の技術革新を進める小規模企業にベンチャー資金を提供する  |
| 温暖化技術先導者基金                  | リスクの高い最新技術の導入によってライバル企業との差別化を図ろうとする大企業に投資インセンティブを付与する   |
| 「足がかり (stepping stone)」協定   | 技術革新連鎖の中間部分において、それぞれの関心に沿った技術を育成するために各国が異なる手法をとることに合意する   |
| <b>市場における基準、浸透、普及に関する協定</b> |   |
| 戦略的展開の協定                    | 実用化されていてもコスト高によって競争力がないため、規模の拡大が必要な低炭素技術を導入するために、各国の目標や施策につき合意する  |
| 障壁撤廃のための協定                  | 低炭素技術の浸透を妨げる障壁（例えば環境に悪影響をもたらす補助金や規制上の障壁）を撤廃する   |
| 温暖化リスクに関する投資家間の国際的イニシアティブ   | 主要な機関投資家（年金基金など）を、先端技術の導入や企業の炭素排出実績をベースとした選別投資に引き込む   |
| 技術移転協定                      | -国連気候変動枠組み条約及び京都議定書、技術移転に関する専門家グループ (EGTT) のもとで既に実現している国際協定など、クリーン技術の先進国から途上国への移転の加速するための協定<br>-これら既存の国際協定や EGTT のマンデートは必要性評価、技術情報、技術移転を実現させるための環境、キャパシティービルディング、特定の技術移転メカニズムをカバーしている (Yamin and Depledge 2004) |

## 5. 結 論

革新的技術の開発は温暖化問題に取り組む上で中心的な役割を果たす。本稿ではエネルギー部門

に関連する技術革新のプロセス、また、温暖化問題に対する国内・国際的な政策への含意を検討した。要点をまとめると以下の3つとなる。

まず、これまで検討してきた技術は、温暖化対策として**可能性**を秘めている。しかしこれはある特定の技術が特効薬として解決するという意味ではなく、エネルギー生産・転換・消費の様々な主要部門に対応した多様な技術オプションの組み合わせを通してのみ、温暖化対策として有効になるということである。本稿で紹介した十数のオプションの Wedge 分析やグローバルシステムモデルの研究でも、この点が重要であることは一貫している。しかし、技術オプションをふるいわけ、パフォーマンスを改善し、大規模な普及をめざすには更なる革新が必要である。

次に、革新的技術の必要性というのは、公的 RD&D 支出や理想的な技術の開発に期待することと同義ではないということである。技術革新プロセスは全般的に、より複雑で興味深いものである。GHG 低排出の産業界を実現するには、その方法が実用可能で費用効果的でなくてはならない。そのためは、エネルギー関連技術とエネルギー供給システムがいくつもの段階を通じて進化していかななくてはならない。民間企業の参加と投資は決定的に重要であるが、公的資金のもとで産み出されたアイデアを民間に効果的に移転するには、まだ多くの解決すべき課題がある。

最後に、炭素の価値付け（排出権取引、炭素税）の手法が低炭素技術への投資を確保する上で重要な要素となるが、それだけでは十分ではないということである。エネルギー生産部門は圧倒的に化石燃料にかたよっており、転換部門・最終消費の各部門（特に発電と建物）は現代の経済においてもっとも非革新的な業種に分類される。これを変えるには、技術革新の連鎖をスムーズに橋渡しする積極的な政策が必要である。簡単に言うと、排出量上限規制は温暖化対策として必要条件ではあるが十分条件ではない。

国際政治に関しては、技術革新の仕組みを理解することは、温暖化の国際交渉において大きな前進に繋がることになるだろう。アメリカ政府や多くの多国籍企業は、温暖化問題への対応として技術の重要性を強調している。一方で、それ以外の多くの国は排出量の絶対的な制限が必要だと主張する。両方とも正しい議論ではあるが、現在の京都議定書には後者しか反映されていない。このように、京都体制には足りない要素があるが、この京都議定書に抜けている問題に取り組みれば、政治的約束に向けての建設的な土台が築けるだろう。

最終章では国家間の技術政策オプションにあたっての複雑な問題点を概観した。重要なのはこれらのオプションをはっきり見極めることである。すなわち、多種多様な技術協力が可能であるが、そのなかには他よりも確かなもの、有用なものがある。今問題となるのは、どういったアプローチが果たして現実的で、実質的に温暖化問題を解決する糸口となるのかを見極めることである。

(Michael Grubb, インペリアルカレッジロンドン客員教授,  
ケンブリッジ大学上席研究員, カーボントラスト政策責任者)  
(訳者 (財)地球産業文化研究所 研究員)

## 参 考 文 献

- Butler, L. and Neuhoff, K. (2004), 'Comparison of feed in tariff, quota and auction mechanisms to support wind power development', CMI Electricity Project Working Paper 70, Cambridge University. <http://www.econ.cam.ac.uk/electricity/publications/wp/ep70.pdf>
- Carbon, Trust (2003), 'Building options for UK renewable energy', Oct 2003. [www.thecarbontrust.co.uk](http://www.thecarbontrust.co.uk)
- Cohen, L.R., R.G. Noll (1991), "The technology pork barrel", (Brookings Institutions Press, Washington D.C., 1991).
- Dowlatabadi, H. (1998), 'Sensitivity of climate change mitigation estimates to assumptions about technical change', *Energy Economics*, 20 (5–6), 473–493.
- DTI (2003), Options for a low carbon future, DTI Economics Paper, no. 4, HMSO, London. Crown copyright.
- Edmonds, J., et al. (2001), "A Global Energy Technology Project Addressing Climate Change: An Initial Report on International Public-Private Collaboration", (Battelle Memorial Institute, JCRI, College Park, MD, 2001).
- Energy Information Administration (EIA, 2002), International Energy Annual. <http://www.eia.doe.gov/iea/contents.html>.
- Foxon, T.J. (2003), Inducing innovation for a low carbon future: drivers, barriers and policies, Carbon Trust, London.
- Fri, R.W. (2003), The role of knowledge: technological innovation in the energy system, *The Energy Journal*, Vol.24 no.4.
- Goldemberg, J., T.B.Johannsson, A.K.N.Reddy, and R.H.Williams (1988), "Energy for a Sustainable World", Wiley Eastern Limited, 1988.
- Gritsevsky, A., and N. Nakicenovic (2002) : Modelling uncertainty of induced technological change. In: Grubler, A., Nakicenovic, N., Nordhaus, W.D. (eds.). *Technological change and the environment. Resources for the Future*, Washington D.C., USA, 251–279.
- Grubb, M., M.HaDuong, T.Chapuis (1995), 'The economics of changing course', in *Energy Policy*, vol.23 no.4/5 pp.417–432.
- Grubb, M., J.Koehler, D.Anderson (2002), 'Induced Technical Change In Energy/Environmental Modelling: analytic approaches and policy implications', *Ann.Rev.En.Env.*, 27: 271–308.
- Grubb, M., C.Hope and R.Fouquet (2002), 'Climatic implications of the Kyoto Protocol: the contribution of international spillover', *Climatic Change*, Kluwer, 2002.
- Grubler, A., Nakicenovic, N., Victor, D.G., (1999a) Dynamics of energy technologies and global change. *Energy Policy*, Vol.27 (5) :247–80
- Grubler, A., N. Nakicenovic, and D. G. Victor (1999b), *Ann. Rev. Energy Environ.* 24: 545–569.
- Herzog, H. (1999), The economics of CO<sub>2</sub> separation and storage. Second Dixv Lee Ray Memorial Symposium, Washington D.C., 1999.
- Hoffert, M.I. et al. (2002), 'Advanced technology paths to climate stability: energy for a greenhouse planet', *Science*, Vol. 298, pp.981–987
- IEA (2003a), Technology innovation, development and diffusion, COM/ENV/EPOC/IEA/SLT (2003) 4, OECD/IEA, Paris.
- IEA (2003b), Creating markets for energy technologies, OECD/IEA, Paris.
- IEA (2003c), World Investment Outlook, OECD/IEA, Paris.
- IEA (2002), CO<sub>2</sub> emissions from fuel combustion, OECD/IEA, Paris.

- IEA (2000), Experience curves for energy technology policy, OECD/IEA, Paris.
- IEA (1999), International collaboration in energy technology – a sampling of success stories, OECD/IEA, Paris.
- IWG (2000), Interlaboratory Working Group on Energy-Efficiency and Clean Energy Technologies, Scenarios for a Clean Energy Future. (Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN, and Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA, 2000).
- IPCC, Climate Change 2001: The IPCC Third Assessment Report, CUP, 2001.
- IPCC (2000), Methodological and technologies issues in Technology Transfer, IPCC Special Report, IPCC/WMO, Geneva.
- Jackson, T. and Oliver, D. (1999), The Market for Solar Photovoltaics, *Energy Policy*, Vol.27, 1999.
- Jaffe, A., Stavins, R. (1995), Dynamic incentives of environmental regulations: The effects of alternative policy instruments on policy diffusion, *Journal of Environmental Economics and Management* 29, S-43-S-63.
- Levine, M.D., A.H.Rosenfeld, and W.Fulkerson (2004), “An Approach to Cutting Energy Demand Growth in Half While Benefiting Industrialized and Developing Nations,” submitted to *Energy Policy*.
- Loiter, J.M. and V.Norberg-Bohm (1999), Technology policy and renewable energy: public roles in the development of new technologies, *Energy Policy*, Vol.27, no.85–97.
- Lomborg, Bjørn (2001), *The Skeptical Environmentalist: Measuring the Real State of the World*, Cambridge University Press, Cambridge, 2001.
- Margolis, R., D. Kammen (1999), *Science*, 285: 690–692.
- Morthorst, P. E. (2005), Economics of wind power. In: Energy technologies for Post Kyoto targets in the medium term. Proceedings. Risø international energy conference, Risø (Denmark), 19–21 May 2003. Søderberg Petersen, L. ; Larsen, H. (eds.), Risø National Laboratory (Denmark). Systems Analysis Department; Risø National Laboratory (Denmark). Information Service Department. Risø R-1405 (EN) (2003) p.104–114.
- Murphy, L., P. Edwards (2003), “Bridging the Valley of Death: Transitioning from Public to Private Sector Financing” (National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado).
- Nakicenovic, N., et al. (2000), Intergovernmental Panel on Climate Change Special Report on Emissions Scenarios (Cambridge University Press, Cambridge, 2000).
- Neuhoff, K. (2005), “Large scale deployment of renewables for electricity generation”, Oxford Review of Economic Policy, vol.21, no.2.
- OECD (2004), “Biomass and agriculture: sustainability, markets and policies”, (OECD, Paris, 2004).
- Pacala, S. and R. Socolow (2004), “Stabilization wedges: Solving the climate problem for the next 50 years with current technologies,” *Science*, 305 (5686), pp.968–972, August 13, 2004, and its Supporting Online Material.
- Papathanasiou, D and D. Anderson (2001), ‘Uncertainties in Responding to Climate Change: on the economic value of technology policies for reducing costs and creating options’ *The Energy Journal*, 23, No. 3: 79–114.
- Rosenberg, W.G., D.C.Alpern, M.R.Walker (2004), ‘Deploying IGCC in this decade with 3rd Party Covenant Financing’, ENRP discussion paper, Belfer Centre, Harvard.
- Shelton, R. and R. Perlack (1996), “Government’s Role in Energy Technology R&D; A Proposed Model for Strategic Guidance”, ORNL/TM-13218, 1996.

- Sandén, B.A. and C. Azar (2005), Near-term technology policies for long-term climate targets—economy wide versus technology specific approaches *Energy Policy*, Vol. 33, no.12, pp.1557–1576.
- Stewart, Richard, and J. Weiner (2003), *Reconstructing Climate Policy: Beyond Kyoto*, AEI Press, Washington D.C.
- UNDP/WEC (2001), *World Energy Assessment 2000—Energy and the Challenge of Sustainability*, Published by World Energy Council and United Nations, New York.
- Weyant, J.P. and T. Olavson (1999), ‘Issues in modeling induced technical change in energy, environmental and climate policy’, *Env. Modeling and Assessment*, v.4, p.67–85.
- Wigley, T., Richels, R., and Edmonds, J. (1996), ‘Economic and environmental choices in the stabilization of atmospheric CO<sub>2</sub> concentrations’, *Nature*, 379, 240–243, Jan 1996.
- World Resources Institute (1997), ‘The Costs of Climate Protection: a guide for the perplexed,’ World Resources Institute, Washington D.C.
- Van der Zwaan, B., A. Rabl (2004), The learning potential of photovoltaics: implications for energy policy *Energy Policy*, 32, no.13: 1545–1554.
- Yamin, F. and J. Depledge (2004), *The international climate change regime: a guide to rules, institutions and procedures*, Cambridge University Press, UK.

