

東京大学教養学部

2009年度冬学期

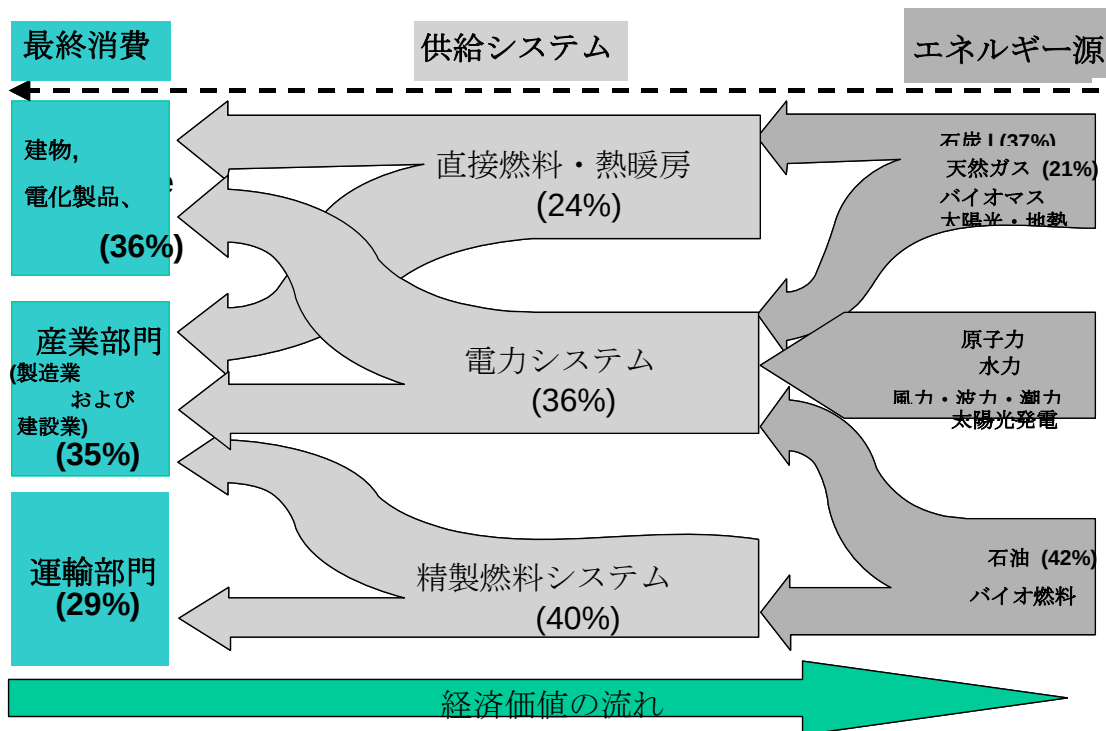
地球温暖化と経済学

第20回 地球温暖化（その8 技術の役割）

山口 光恒

低炭素社会を目指して（Michael Grubb の論文紹介を中心に）

1、世界のエネルギー起源 CO2 排出 エネルギー供給と需要の全てで排出削減が必要



2、資源制約問題

エネルギーシステムを制約するものはエネルギー資源そのものではない。制約条件は、エネルギー源と供給システムを如何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

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

石炭は技術進歩とともに生産が大幅に拡大。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

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。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

天然ガスの資源量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)」。

しかし、パイプラインとLNG（液化天然ガス）の開発によって、同資源へのアクセス

スを容易にするようなマーケットが出来つつある

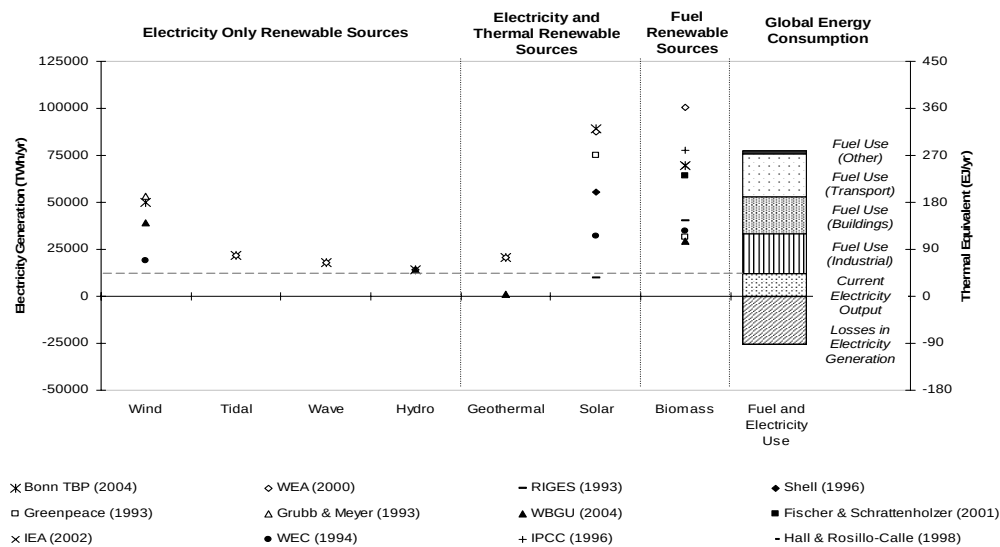
原子力に関しては、ウラン埋蔵量の枯渇によって原子力発電の拡大が大きく制約されるということは今世紀半ばまではまずない

再生可能エネルギー

地球規模の潮力、波力、水力の潜在量は世界の電力消費規模に匹敵（下図参照）

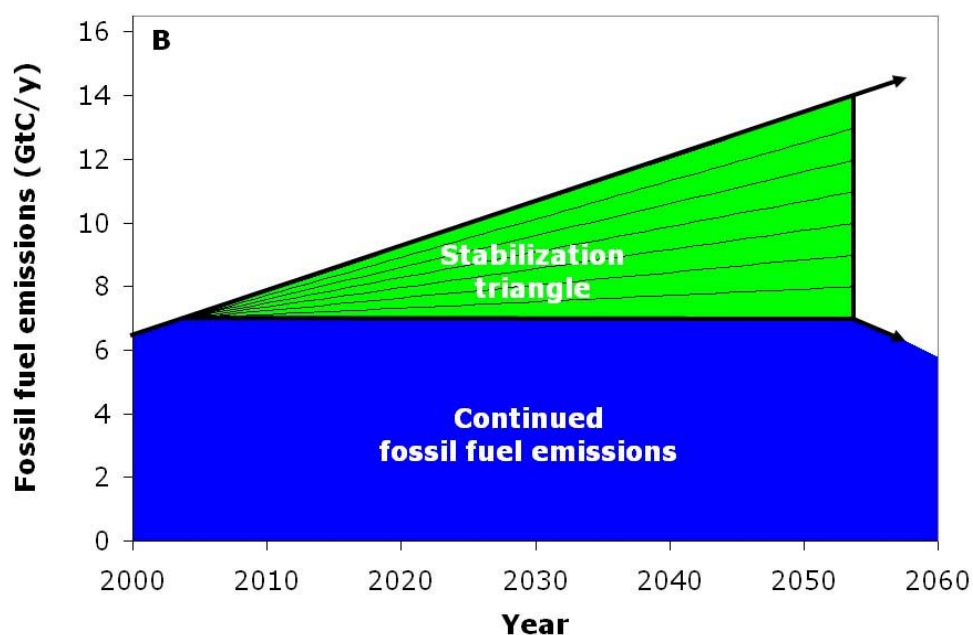
風力、太陽光は上述の再生可能エネルギー源よりもはるかに大きいとする推定される

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及び電力需要



左側：潜在発電量、右側：世界のエネルギー消費量

3、技術オプション Pacala & Socolow, Princeton Wedge Science Volume 35, Aug. 2004



石炭火力発電に代えて2メガワット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 但しコスト無視
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なし

4、技術開発 Technology push か Demand Pull か

Technology Push (政府による研究開発主導)

Wigley, Richels, Edmonds など

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

Demand pull (市場主導)

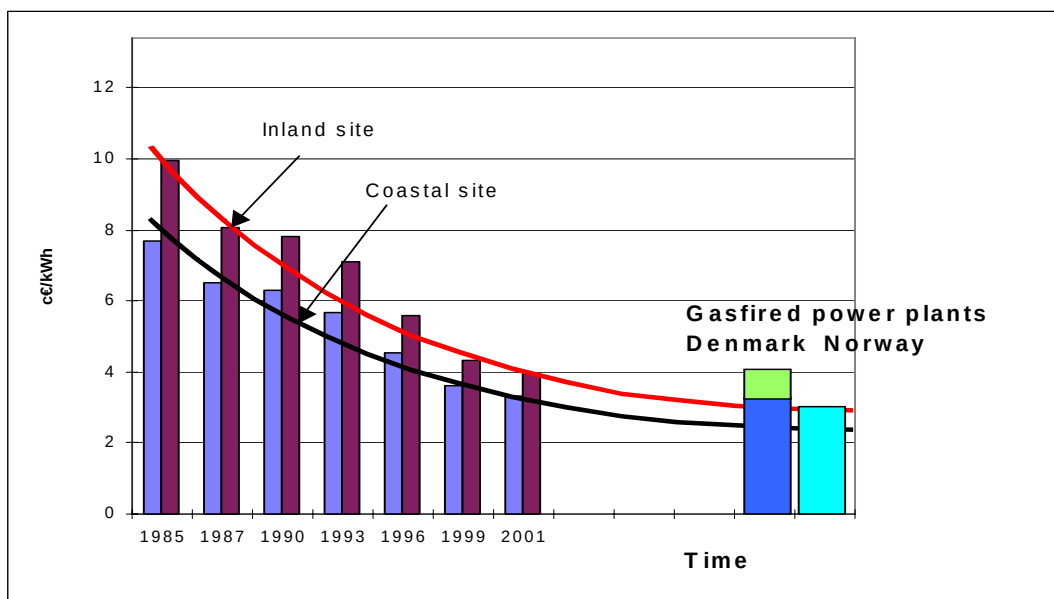
技術革新は民間部門から起こるべき、経済的インセンティブが重要

技術ベースの規制、GHG 排出量の絶対値規制、税といった手法の活用が有用

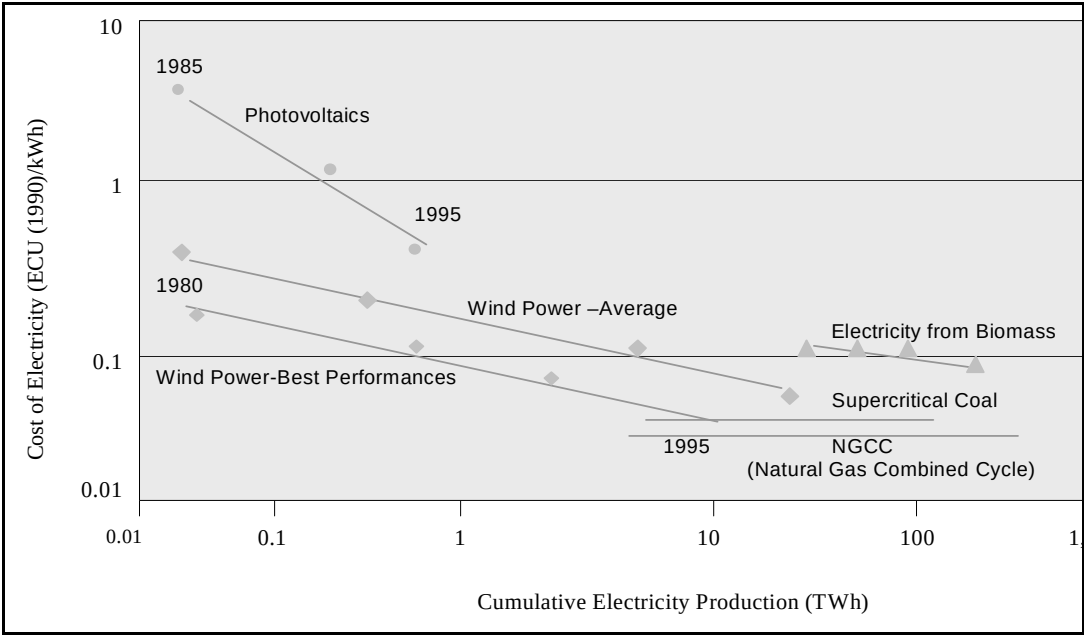
GHG 排出量規制導入時期を遅らせると、その分企業の排出削減技術の開発も遅れる

5、技術開発と学習曲線

デンマークの風力発電コストの推移



エネルギー関連技術の学習曲線



6、技術とコスト

発電技術の現在及び中期予測コスト

技術	現在のコスト (cents/kWh)	中期予測	備考
現行の化石燃料発電所			
天然ガス CCGT* 石炭 *Combined Cycle Gas Turbine: 複合型ガスタービン	3-4 3.5-4.5	燃料価格及び炭素の排出制限/価格システムによる	\$10-20/tCO ₂ の炭素価格 (EU の排出権取引で一般に予測されている価格) だと、CCGT の発電コストを約 0.6-1.2c./kWh 引き上げ、石炭の発電コストを 1.2-2.4c./kWh 引き上げる
非常に低炭素な電力技術			
炭素回収・貯留 天然ガスとの組み合わせ 石炭 IGCC*との組み合わせ *Integrated Gasification Combined Cycle : ガス化複合発電	NA NA	4-6 5-8	技術は確立しているが、ある程度大きな規模では試用されていない
原子力	5-7	4-8	-コストは投資に際しての利率や建設期間によって異なる -学習効果は低い

バイオマス 石炭と共に燃焼 最新式バイオマス(電力) CHP (熱電併給)	2.5 – 5 5 – 15 6 – 15	2.5 – 5 5 – 9 5 – 12	-コストは原料になるものや 転換設備によって異なる -農場/森林からの廃棄物は発 電用作物よりも安い
風力 陸上 洋上	5 – 8 9 – 12	2 – 4 3 – 8	-場所によってコストのばら つきがある -陸上については学習曲線や 良質な技術データが急速に 整備されてきたが、洋上に関 してはデータ整備が十分と はいえない
潮流/波力	13 – 20	<15	技術の未熟性により、パ ラメトリックモデル (parametric models) からの推定
配電網完備の PV* 1000 kWh/m ² /年 (UK) 2500 kWh/m ² /年 (アフリカ,南ア ジア) *photovoltaics : 太陽光発電	50 – 80 20 – 40	15 – 25 5 – 15	高い成長性と学習効果の結 果コスト低下。最終消費地に 近いほど付加価値が高い

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

- ・ 中期におけるポテンシャルコストが 5 – 7 セント/kW の “非常に低炭素のオプシ
ョンが多様（炭素の回収・貯留、原子力、最新式バイオマス、洋上風力）
- ・ 既存技術で対応可能

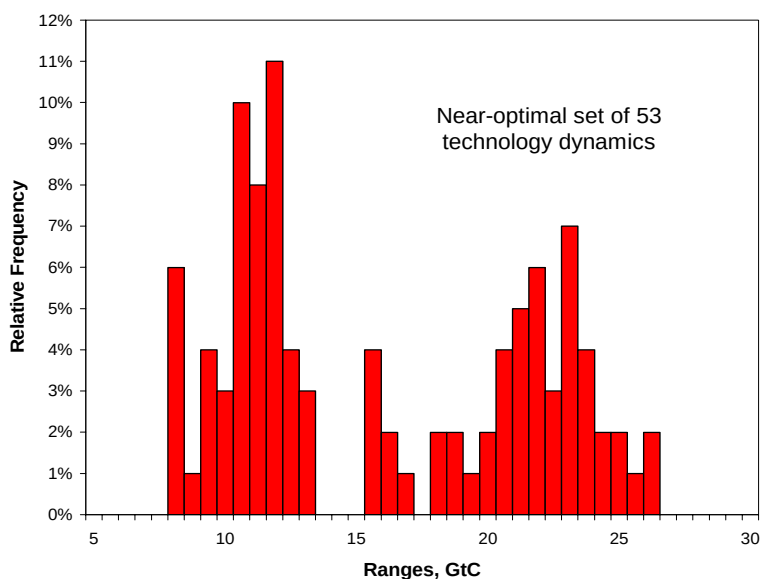
運輸部門はバイオ燃料、電気、水素（但し後 2 者は CO₂ 低発生エネルギー源からの製造・発電に限る）
バイオ燃料の現在のコストと 2020 年の予測 (\$cents/litre g.e.)

技術	現在のコスト	2020 年予測
ガソリン/ (ディーゼル) のコスト 原油価格を約 \$50/barrel (FOB Gulf 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

- ・ なかなかガソリンに対抗できない。ブラジルのエタノールは例外
- ・ ハイブリッド自動車は CO₂ 排出量を削減可能、但し動力となる電気が CCGT ある
いは低炭素の燃料で発電される場合のみ
- ・ 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
- ・ バイオ燃料と水素は低炭素電力よりもコスト高

不確実性下の技術革新と世界のエネルギーシステム (IIASA)

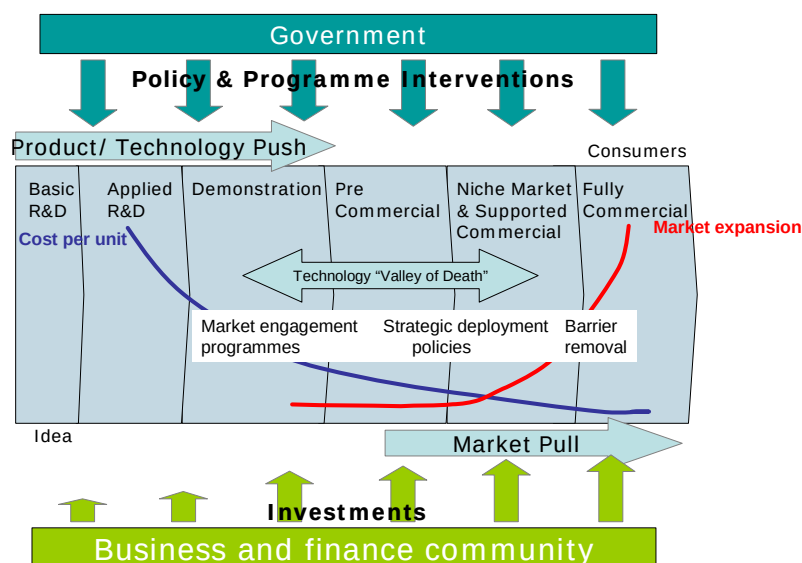
53の最小コストシナリオにおける2100年までのGHG排出量



最小コストシナリオの排出量は必ずしもエネルギー集約的なものとは限らない。石油代替エネルギーへの投資は高炭素燃料（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 But how?

7、エネルギー・環境技術と政策

技術革新の連鎖と技術の「死の谷」



技術革新と業種別相違

電力：技術革新とは基本的に効率性の向上と価格低減。革新的技術への誘因としては弱い。

I T：競争が非常に激しく、製品の差別化（よりよいパソコン）が必須

石油：上記の中間

上記から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（電力と建物はほぼ同じ状況）

低炭素技術開発のインセンティブ

炭素コストの内部化 不確実且つ誘因として弱い

公的R&Dも代替誘因としては弱い

1980年代以降半減、原因は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。

→ビジネスとしての土台を築くまでに、内因的な障害が存在

→技術の死の谷（**technology valley of death**）の存在（連鎖が繋がらない）

公的R&Dは件数の少なさ、商業的有効利用に繋がらず。死の谷を埋められず

技術革新の格差を縮めるための枠組み

- ・ 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
- ・ 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
- ・ 政府が炭素税や強制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る

温暖化のような巨大で長期的な問題の場合、上記のみでは不十分。

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

技術革新の格差を縮めるための政策

- ・ 市場化プログラム
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する

- ・ 新技術の戦略的展開のための政策

大規模の市場を形成し、新技術のコストを低減

- ・ 障壁の撤廃

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

- ・ 外部性の内部化政策

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

連鎖の最終段階においての排出権取引や炭素税は既存の CO₂ 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

技術革新プロセスの早い段階での学習効果は、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)

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一つの側面

市場化プログラム

- ・ 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

- ・ 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、投資家や潜在的使用者に技術とその集合の実際の効果に対する自信を与える

- ・ 障壁の撤廃

既存技術を優遇するような補助金、事実上差別的に作用する規制など

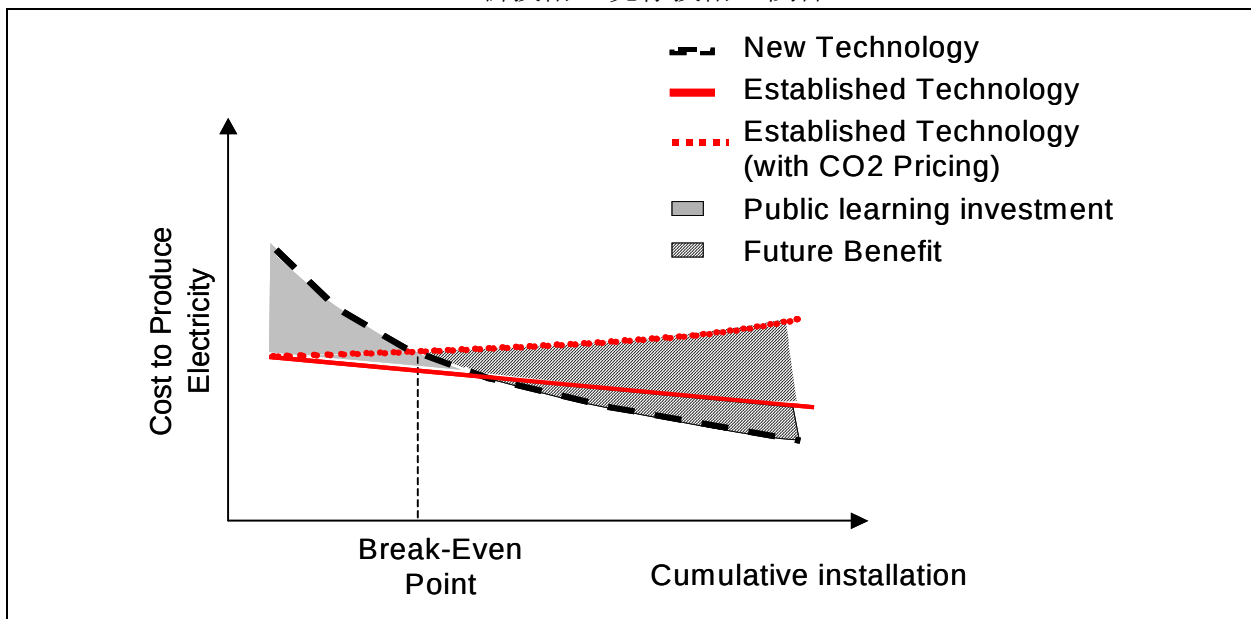
既存の市場参加者は外部費用のすべてを負担することを免れている

- ・ エネルギー需要側の新技術は一般に費用効果的、市場化プログラムと障壁撤廃それに技術基準などの導入は効果的（省エネの革新的技術を生む可能性あり）
- ・ エネルギー供給側の新技術（発電）は時間規模が長く、製品差別化が出来ず、価格も規制されているなど新技術への誘因が弱い。技術革新の連鎖の中間部分をリンクさせる政策が必要

新技術の戦略的展開：その手法と経済性

- ・ 技術があ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分野に有効
- ・ 新技術の戦略的展開には、技術導入のインセンティブとなる規制を設ける必要
- ・ 典型的な例は、再生可能エネルギー普及支援策（風力発電電力の固定価格買い取り制度など）
- ・ これと並んで炭素排出コストの内部化も進める

新技術と既存技術の関係



- ・ 他のエネルギー供給技術（IGCC、PVなど）にはより多くの投資が必要
- ・ 運輸部門で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投資に振り向けることで。そのための RD&D、CO₂ 排出権取引制度、技術の市場化、障壁撤廃、戦略的展開のための政策が必要

8、国家間の技術協力 省略

9、結論

- 1) さまざま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
- 2) 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
- 3) 炭素の価値付け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（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)

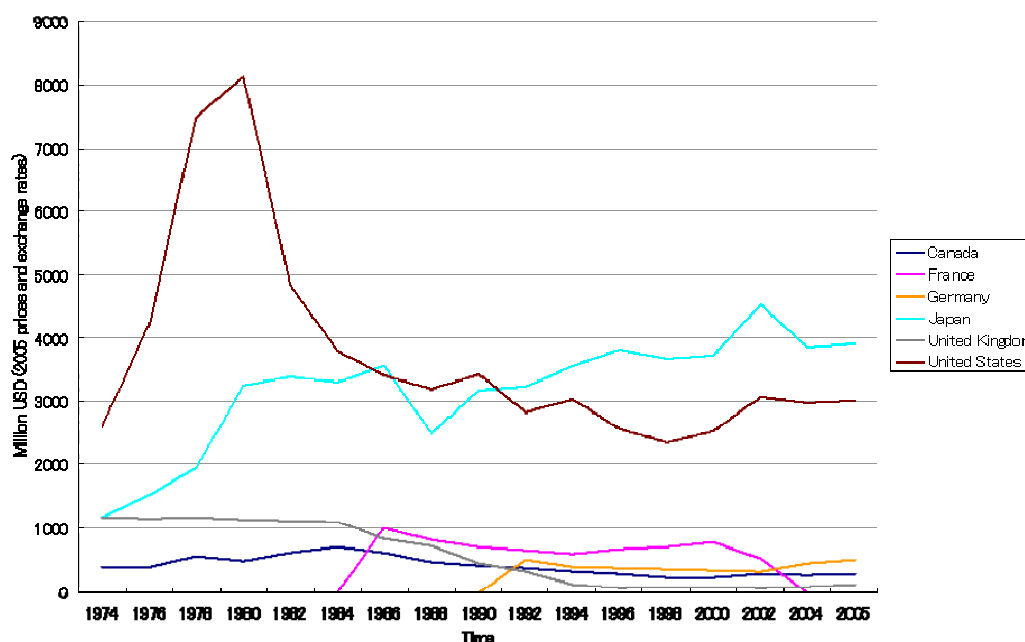
10、補足

1) Sanden, B.A. and Azar, C. (2005)の Technology Lock-In のリスク

We make a distinction between economy wide and technology specific policy instruments and put forward two key hypotheses: (i) Near-term carbon targets such as the Kyoto protocol can be met by economy wide price instruments (carbon taxes, or a cap-and-trade system) changing the technologies we pick from the shelf (higher energy efficiency in cars, buildings and industry, wind, biomass for heat and electricity, natural gas instead of coal, solar thermal, etc.). (ii) Technology specific policies are needed to bring new technologies to the shelf.

There is a risk that the society in its quest for cost efficiency in meeting near-term emissions targets, becomes blindfolded when it comes to the more difficult, but equally important issue of bringing more advanced technologies to the shelf.

2) 政府R&Dの国別比較（出典：I E A）



参考資料

マイケル・グラブ「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」三田学会雑誌98巻2号 2005年7月

Sanden, B.A. and Azar, C. (2005), "Near-term technology policies for long-term climate targets --- economy wide versus technology specific approaches", *Energy Policy* 33 1557-1576

Neuhoff, K. (2005), "Large-scale deployment of renewables for electricity generation", *Oxford Review of Economic Policy*, Vol. 21 No. 1, 88-110

Grubb, M. (2005), Technology Innovation and Climate Change Policy: an overview of issues and options" *Keio Economic Studies*, Vol. 41, No. 2 2004

Gritsevskiy, A. and Nakicenovic, N. (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, 251-279

Pacala, S. and Socolow, R. (2004), "Stabilization Wedges: Solving the Climate Problem for the Next 50 Years with Current Technologies", *Science* Vol. 305, 968-972

他多数