

平成18年度日本自転車振興会補助事業

エネルギー技術開発普及促進に係る調査研究委員会
報告書

平成19年3月

財団法人 地球産業文化研究所

はじめに

2005年2月に発効した京都議定書の第一約束期間までわずかとなった。一方で、第一約束期間以降の国際枠組みの議論が世界的に活発となり、国連の場では国際交渉が開始した。

温暖化を巡る国際的な議論は南北対立とも言える。先進国は、懸念される温暖化問題は自ら排出した温室効果ガスの累積によるものとは認めるものの、一部の途上国の急速な経済発展にともなう排出量の増大を目の当たりにし、これらの国も何らかの排出削減努力をするべきだと主張する。途上国は排出削減が経済成長の足かせになることに懸念し、問題を引き起こした先進国が目に見える削減を実現することが先決、とし、自らの排出削減には先進国の技術移転、資金援助が必要だと主張する。

両者の意見の対立は大きい、唯一異論がないのは革新的技術の開発・普及の重要性であろう。というのも、温室効果ガスの濃度をどのレベルに安定化するにしても地球規模で大幅な排出量の削減が長期にわたって必要で、そのためには現在広く市場に普及している技術だけでは不可能であり、社会構造の変革とも言える革新的な技術の大規模な開発・普及が求められることは明確だからである。したがって、将来の国際枠組みが効果的であるためにはこのような革新技術の要素を取り入れたものでなくてはならない。

本調査研究では、将来の国際枠組みのあり方の検討を大きな目的としている。エネルギー部門での技術革新に焦点を当て、大幅な排出削減を可能にする技術の組み合わせを把握し、その組み合わせを現実のものとする温暖化政策、技術政策といった様々な政策や国際協力を検討した。

上述の通り温暖化問題の究極的な解決には革新的技術のもと社会構造の変革が迫られるだろうことから、機械工業等我が国の産業界への影響ははかり知れない。

本調査研究が我が国政府及び産業界の温暖化対策の長期戦略の一助となれば幸いである。

平成19年3月
財団法人 地球産業文化研究所

「エネルギー技術開発普及促進に係る調査研究委員会」委員会名簿

(敬称略、委員：五十音順)

委員長

山口光恒 帝京大学 経済学部 教授
東京大学 先端科学技術研究センター 客員教授

委員

秋元圭吾 地球環境産業技術研究機構 システム研究グループ主任研究員
岡 敏弘 福井県立大学大学院経済・経営学研究科 教授
木村 幸 電力中央研究所 社会経済研究所 研究員
工藤拓毅 日本エネルギー経済研究所 地球環境ユニット ユニット統括
瀬川浩司 東京大学 先端科学技術研究センター 教授
堤 敦司 東京大学大学院 工学系研究科 助教授
藤井康正 東京大学大学院 新領域創成科学研究科 助教授

オブザーバー

遠藤健太郎 経済産業省 産業技術環境局 環境交渉官
増永 明 経済産業省 産業技術環境局 地球環境対策室 室長
岡本 晋 経済産業省 産業技術環境局 地球環境対策室 課長補佐
西尾匡弘 経済産業省 産業技術環境局 地球環境対策室 課長補佐
関根豪政 慶應義塾大学大学院法学研究科博士課程
畔上泰尚 慶應義塾大学大学院経済学研究科修士課程
新井光雄 地球産業文化研究所 理事

事務局

吉田 博 地球産業文化研究所 地球環境対策部 部長
信岡洋子 地球産業文化研究所 地球環境対策部 研究員

(平成19年3月31日現在)

概要

平成 18 年度、(財)地球産業文化研究所は、革新的エネルギー技術の開発・普及に焦点を当てた長期的な国際枠組みのあり方の検討のため「エネルギー技術開発普及促進に係る調査研究委員会」を設置した。当調査研究では山口光恒委員長（帝京大学教授、東京大学客員教授）のもと委員会会合を 4 回開催した。毎回委員もしくは外部講師に講演をしていただき、活発な議論が行われた。オブザーバーとして政策立案・国際交渉の当事者である経済産業省にも参加していただいた。

当調査研究の問題認識は以下のとおりである；国連気候変動枠組み条約第 2 条には、その究極目標として「気候系に対して危険な人為的干渉を及ぼすこととならない水準において大気中の温室効果ガスの濃度を安定化させる」と規定しているが、この「危険な人為的干渉」の具体的なレベルに関する世界的な合意は不可能である。一方、いかなる濃度レベルでの安定化にも大幅な温室効果ガス排出の削減が必要である。そのためには技術革新が必要で、どのような国際枠組みが効果的にそのような技術革新を促すだろうか。

当調査研究では、まずモデル分析をもとに低炭素社会に必要なエネルギー関連技術とその必要規模を把握し、そして必要な技術の可能性を実現する国際枠組みのための戦略・政策を議論した。

本報告書は第一部と第二部で構成される。

第一部は調査委員会での発表と議論をもとにし、温暖化問題に置けるエネルギー技術の開発・普及に関する問題認識を第 1 章で論じる。そして第 2 章で、長期的にわたる排出量の大幅削減のためにどのような技術がどの程度必要なのか、モデル研究を参考に検討を試みる。持続可能型社会のために今後必要とされるエネルギー関連投資にも触れる。第 3 章では、前章で検討した幅広い技術オプションを実現させる国際枠組みのあり方を、モデル分析をもとに論じる。第 4 章ではエネルギー技術固有の論点と今後の課題を挙げる。

第二部では、学術文献を参考に、技術革新を巡る論点をまとめたほか、調査委員会度々引用された SRES シナリオと内生的技術変化及びその代表的なモデル研究を紹介する。

本調査研究の検討の要点は以下である。

・温室効果ガス濃度の安定化を効率的に達成するには幅広い技術オプションが必要である：
統合評価モデルの分析によると、所与の濃度制約、エネルギー需要の制約のもとで最適な（費用最小の）エネルギーシステムを確立するには、今後省エネ、低炭素エネルギー源への転換、炭素隔離貯留技術それぞれの大幅な普及が求められる。

・ただし、個別技術について克服すべき技術的課題は多い：
モデル分析では技術オプションのそれぞれにつき長期にわたって、コスト低下や効率性向上を外生的に仮定しているが、その仮定が技術面・経済面において現実的であるかは不確

実な場合もある。

・将来必要となるエネルギー関連投資は莫大であるが、低炭素社会に向けて長期的なビジョンを持つことによって必要とされる投資額は大幅に削減できる：

増え続ける世界のエネルギー需要に応えるには 2030 年までに 20 兆ドルという莫大な投資が必要とされる。2100 年までの長期で見ると持続可能型の社会（SRES B1 シナリオ）において投資額が最も少なくすむ。したがって、どのような経済・社会を選択するかによって投資額は莫大な差となるため政府は長期的なビジョンを持つことが重要である。

・エネルギーは製品の特性ではなく価格ベースの競争となるため、他分野の技術と比べて技術革新が進みにくい：

習熟によって技術の限界生産性が向上し、経済が成長し更に技術が習熟する。このように技術革新はスパイラル的なダイナミズムで発展していくことは可能であるが、エネルギー分野では、例えば電力ではエネルギー源が何であれ同じ「電子」という物質を生産するので製品の差別化が難しく、イノベーションが起こりにくい。加えて、発電所などエネルギー関連インフラの寿命は 40-50 年と長いため、革新的技術が市場に到達するまで長い時間を必要とする。

・革新的エネルギー技術の開発には政府による R&D 投資が必要である：

不確実性が高く規模の大きいエネルギー R&D に投資することはリスクが高すぎることに、また R&D の成果は必ずしも独占できないことから、民間による R&D 投資だけでは社会的に必要なレベルに到達しない。政府による大規模なエネルギー R&D 投資が必要である。

・現在の京都議定書のような、アメリカ以外の先進国のみ国別削減目標を負う枠組みよりも、アジア太平洋パートナーシップ（APP）のような参加国数が少なくても大排出国が行動にコミットする枠組みの方が効果的、効率的な排出量削減を達成しうる：

モデル分析によると、APP の枠組みは 6 カ国のみであっても削減ポテンシャルの多い国を含むため、現行の京都議定書よりも費用効果的な排出削減が可能だろう。

・技術習熟を考慮すると、京都議定書のような早期の数値目標よりも、長期的な目標の方が技術変化を誘発し低コストで排出削減目標の達成を実現しうる：

APP のようなボトムアップの国際枠組みとともに、トップダウンの枠組みとして 2050 年といった長期の目標を掲げることによって、将来の技術進展のポテンシャルを重視した技術戦略をとりやすくなり、低コストで排出削減が達成できるだろう。

・今後の研究課題として、我が国が掲げるべき長期目標の検討が挙げられる：

当調査研究では技術オプションの必要とする普及規模と投資規模、それらの可能性と限界を把握し、将来枠組みのあり方としてボトムアップ型や長期目標を議論した。今後の課題として、我が国の掲げるべき世界規模及び国内の長期目標の具体的な検討が挙げられる。

本報告書は委員会での発表、議論、及び学術文献をもとにしたものであるが、内容の誤り等一切の責任は(財)地球産業文化研究所にある。

Summary

In fiscal year 2006, Global Industrial and Social Progress Research Institute set up the “Research Committee on Energy Technology Development and Diffusion” to consider a possible long-term international framework on climate change. Under the chairmanship of Prof. Mitsutsune Yamaguchi, Teikyo University and the University of Tokyo, four meetings were held. At each meeting, there was a speech by a committee member(s) or external expert, followed by an intensive discussion among participants. Officials from the Ministry of Economy, Trade and Industry, who are directly involved in the actual policy-making and international negotiation, also participated.

The starting point of the discussion is as follows: The United Nations Framework Convention on Climate Change stipulates in its article 2 that the ultimate objective of the Convention is to achieve stabilisation of greenhouse gas (GHG) concentrations in the atmosphere “at a level that would prevent dangerous anthropogenic interference with the climate system”. However, it is impossible to reach a consensus internationally on “what level” would be one that would prevent such interference. In the meantime, in order to achieve stabilisation of atmospheric concentrations at *any* level, substantial reductions are ultimately needed. For that to happen, technological innovation is of crucial importance. What kind of international framework would promote the needed technological innovation most effectively and efficiently?

To answer this question, the research committee first attempted to identify potentials of energy technologies and assess the scale necessary to build a low carbon society, using modelling analyses. Secondly, it focused on the issue on a possible future framework that would realise those innovation potentials.

This report consists of two parts.

Part I is based on the presentations and discussions at the committee meetings. Chapter 1 discusses the overview, the starting point of our consideration. The second chapter considers, based on modelling studies, what kinds of technologies on what scale would be required for deep reductions in the long term. It also refers to the related investment issue. Chapter 3 describes recent modelling studies to seek an international framework for effective and efficient development of the wide range of technology options as identified in the previous chapter. The last chapter deals with difficulties inherent to energy technologies and issues to be tackled in future research.

Part II summarises some of the important issues regarding technological innovation. It is largely based on the literature and describes typically-divided views on innovation,

and innovation chain as well as explains SRES scenarios, induced technological change (ITC) and a modelling study featuring ITC.

The important points of our conclusions are as follows:

• A range of technology options are required to efficiently achieve atmospheric stabilisation:

Integrated assessment model studies show that, given a stabilisation target and global energy demand path, substantial diffusion of a range of technologies including energy efficiency, energy switching to low-carbon sources and carbon capture and storage is required in order to establish an energy system efficiently.

• However, each technology has problems to be resolved for a wide diffusion:

Modelling analyses give each of the technologies an exogenous assumption regarding cost reduction and efficiency improvement over a long-term. These assumptions may not necessarily be perceived as technically or economically feasible.

• The energy-related investment needed in the future is enormous, but having a clear long-term vision will help the government reduce the needed amount significantly:

To meet the global energy demand that continues to increase, it is estimated that the necessary investment up to 2030 will be as large as US\$20 trillion on the global scale. In terms of the long-term up to 2100, the estimated investment cost is lowest in a sustainable society as described in the SRES B1 scenario. This raises an important point that a decision made today on social and economic development path will make a significant difference in the needed investment in the long-run. The government, therefore, should hold a clear long-term vision.

• Energy sector is not an innovative sector compared to others as the competition in the sector is essentially based on price rather than product differentiation:

Technology learning improves marginal productivity of technology, which grows the economy and, in turn, develops further the technology. Technological innovation can occur with the spiral dynamism like this. However, this may not always hold true in the energy sector. For example, innovation in power generation is basically about efficiency and price in delivering the same product (electrons) whatever the energy source might be while competition in other sectors are all around product differentiation. In addition, due to the longevity of energy-related infrastructure such as power plants, it may take as long as several decades until innovative technology reaches the market.

• Government R&D investment is required for development of innovative energy technologies:

Private R&D alone will not sufficiently fulfill the socially optimal level because it is

generally too risky for the private to invest in energy technologies which are inherently large and uncertain. Moreover, the fact that the knowledge gained from the investment is often not entirely appropriable to the innovative company deters the private investment. Therefore, what is called for is large-scale investment by the government.

• An international framework like the Asia-Pacific Partnership, in which a small number but of big emitting countries commit to actions, could achieve emission reductions more effectively and efficiently than the current Kyoto, in which the developed countries except the US have absolute reduction target:

According to a modelling analysis, the APP could reduce emissions more cost-effectively than the Kyoto Protocol because the framework includes large emitters with large reduction potentials.

• Taking technological learning into consideration, a long-term target, rather than short-term targets as in the Kyoto Protocol, would induce technological change, thereby achieve the target at less cost:

Together with the bottom-up type of international regime like the APP, a long-term target (for instance, for 2050) as a top-down type approach would be effective. It would help develop a technology strategy focusing on long-term technology potentials, which will lead to cheaper emission reductions.

• Future research may need to tackle the issue of the long-term target to which Japan should commit:

The research committee identified the necessary scale of technology options and their potentials and limitations as well as discussed the future framework options such as bottom-up type and long-term targets. Future research may want to consider concrete long-term targets Japan should set for itself and the world as whole.

This report is largely based on the presentation and discussions at the committee meetings and the literature. However, any errors are solely the responsibilities of the GISPRI.

目次

はじめに.....	i
「エネルギー技術開発普及促進に係る調査研究委員会」委員会名簿.....	ii
概要.....	iii
Summary.....	v
第一部.....	1
第1章 問題認識.....	1
1. 1 「危険な濃度レベル」とは何か.....	1
1. 2 排出量の長期的で大幅な削減の必要性.....	5
第2章 長期的な大幅削減のために.....	6
2. 1 世界エネルギーモデルを用いた温暖化の統合評価 (MG3).....	6
2. 2 IIASA によるモデル分析.....	10
2. 3 モデル分析の政策への含意：長期的な大幅削減のために.....	15
第3章 低炭素社会に必要な技術を実現させる国際枠組みの検討.....	16
3. 1 トップダウンかボトムアップか.....	16
3. 2 長期目標か短期目標か.....	21
第4章 技術革新における課題.....	26
4. 1 エネルギー技術の革新における課題.....	26
4. 2 今後の検討課題.....	27
第二部 関連事項のまとめ.....	28
第1章 温暖化・エネルギー関連技術開発をめぐる論点.....	28
1. 1 研究開発主導 (technology-push) と市場主導 (market-pull/demand-pull)	28
1. 2 技術革新の連鎖.....	28
1. 3 政策への含意.....	31
第2章 SRRES 排出シナリオ.....	32
第3章 技術習熟内生モデルとは.....	36
3. 1 定義.....	36
3. 2 技術習熟内生モデル.....	36
3. 3 技術習熟内生モデルの含意.....	38
3. 4 ITC の最新動向.....	39
第4章 内生的技術変化を組み込んだ分析.....	41
4. 1 モデルのアプローチ.....	41
4. 2 モデルで考慮した要素.....	42
4. 3 結論.....	44
参考資料 議事要旨.....	45

第一部

第1章 問題認識

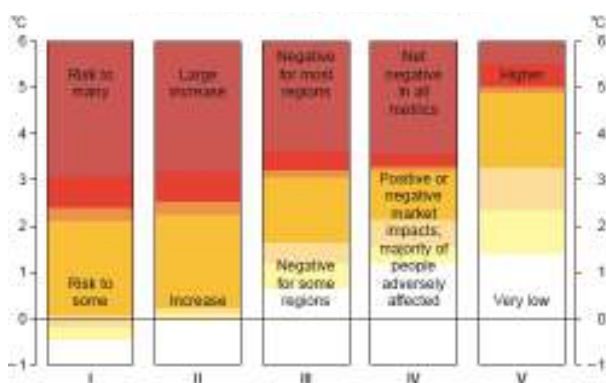
第1章では、調査研究委員会第1回会合における山口委員長の発表及び著書などをもとに、本調査研究における問題認識を論じる。

1. 1 「危険な濃度レベル」とは何か

2006年11月現在、国連気候変動枠組み条約（United Nations Framework Convention on Climate Change、以下UNFCCC）には189カ国及び欧州連合（EU）が批准している。UNFCCCを親条約とする京都議定書への批准を拒んだアメリカ、オーストラリアもUNFCCCの締約国である。この条約の目的（Objective）はその第2条に以下のように述べられている。

「本条約および条約締約国が採択する関連法的手段の究極の目的は、本条約の関連規定に従い、気候系に対して危険な人為的干渉を及ぼすこととならない水準において大気中の温室効果ガスの濃度を安定化させることである。そのような水準は、生態系が気候変動に自然に適応し、食糧の生産が脅かされず、かつ、経済開発が持続可能な態様で進行することができるような範囲内で達成されるべきである¹⁾」。

このなかで、何をもって「危険な人為的干渉（dangerous anthropogenic interference、以下DAIと呼ぶ）」と見なすか、国際的な合意を得ることは不可能である。



図表 1-1 気温上昇とその影響(影響カテゴリー別)

I、種の多様性等、II、異常気象、III、影響の地理的範囲、IV、損害額、V、大規模且つ不連続な事象
縦軸の温度は1990年からの気温上昇幅、と横軸はリスクの分類、5つの棒グラフは2100年までの気候変動リスクを示すIPCC(2001)

¹ 原文は“The ultimate objective of this Convention and any related legal instruments that the Conference of the Parties may adopt is to achieve, in accordance with the relevant provisions of the Convention, stabilization of greenhouse gas concentrations in the atmosphere at a level that would prevent dangerous anthropogenic interference with the climate system. Such a level should be achieved within a time-frame sufficient to allow ecosystems to adapt naturally to climate change, to ensure that food production is not threatened and to enable economic development to proceed in a sustainable manner.”

この点EUはかねてから世界の平均気温の上昇を工業化以前と比べ摂氏2度以内に抑えることを目標とするよう、EU内のみならず国際交渉の場でも主張している。これは1996年6月の環境理事会の決定に始まり、以後常に主張していることだが、科学的な根拠はない。

一方、温暖化による海面上昇の影響で国家の存続が危ぶまれる小島嶼国などは、既に気候変動の悪影響と見られる現象の損害を受けており2度上昇は到底許容できないとし、既にDAIに到達していると主張する。

図表1-1はIPCC第3次評価報告書からの引用であるが、ここから分かるように、「V、大規模且つ不連続な事象」をDAIとするならば、4度程度の上昇まで許容できるとなる。ここでの「大規模且つ不連続な事象」とは、熱塩循環の崩壊、グリーンランドや西南極氷床の融解、炭素循環フィードバックによる温暖化の加速などを指す。つまり何を「危険な人為的干渉」と見なすかは客観的に判断して1つに決めることは不可能である。山口委員長の発表では「危険な人為的干渉」のレベルを決める代表的な二つのアプローチと研究例が紹介された。容認範囲アプローチ (Tolerable Windows Approach)と費用便益アプローチである。

1) 容認範囲アプローチ

容認範囲アプローチの代表的なものには、水不足や病気の蔓延といった温暖化による影響を受ける人口を基準としたものと、種の絶滅や熱塩循環停止といった持続性を基準としたものがある。前者の研究の例としてParry et al. (2001) が挙げられる。同研究は、気候変動による水不足、飢餓、水位上昇による海岸線の冠水、マラリアのリスクに曝される人口 (millions at risk) による「危険」の定量的測定を提唱している。これは上記IPCCの5つのカテゴリーのうちII、III、IVを対象とするものであり、これらは徐々にリスクが増す、連続的なタイプのものである(一方、IとVは一度閾値を越えてしまうと不可逆性を持つ不連続な類のリスクである)。この基準は一見客観的にみえるが、どの程度に達したら「危険」なレベルと言えるのか、また、水不足と飢餓や病気の間での重み付けをどうするかに関し、科学的知見による合意形成は困難である。

後者の持続性基準 (sustainability approach) は、種の絶滅や大規模かつ不連続な事象(熱塩循環停止、西部南極氷床融解など)のように、持続可能性を危うくするリスク(つまり上図のIとVのリスク)に注目して、DAIを判定しようというものである。Oppenheimer and Petsonk (2005) 及びOppenheimer (2005) の研究が例として挙げられる。DAIの科学的な決定の不可能なことをさらに裏付けるものである。

前者は様々な文献をもとに、熱塩循環 (Thermohaline Circulation: THC) 停止や西部南極氷床 (West Antarctic Ice Sheet: WAIS)、グリーンランド氷床 (Greenland Ice Sheet: GIS) の融解、さんご礁の広範な死滅といった各事象が起こると考えられるCO2濃度や気温上昇幅を挙げて、DAIを定義する具体的数値を提起している。しかし、これら事象の発生に対応するCO2濃度、気温上昇幅はそれぞれ異なり、このうちどれを条約第2条のDAIとするかは結局は政治的判断によるものである。

Oppenheimer (2005) は、西部南極氷床崩壊 (WAIS) あるいはグリーンランドの氷床融

解（GIS）を便宜的にDAIと見なし、どちらかが完全に崩壊すると世界の海面は平均5メートル（WAIS崩壊）または7メートル（GIS崩壊）上昇するだろうと述べている。その影響は甚大で、堤防の建設が困難なバングラデシュの大部分やフロリダ半島南部が水没するだろうとしている。また、同様に海拔の低いオランダやニューヨークのマンハッタンにおいては、被害の予防が可能であっても極端に高い費用を要するだろうとしている。沿岸地域は世界的に経済活動が集中しているので、このようなことが数百年間に起これば甚大な文化的損失と社会活動の大移動が起こるだろう。したがって、もし政治的、文化的に危険と見なされる気候変動の影響があるのなら、WAIS、GISの崩壊こそ「危険」であると述べている。一方で、次のように注意が必要であると述べている。すなわち、どの程度の気温上昇がどの程度の氷床崩壊と海面上昇を誘発するのか、また、それはどの程度の期間にわたって生じるのかに関し、あまりにも不確実性が高い。所与の気温上昇による氷床損失の確率はあまりにも不確実であるので、不確実性が定量化されたとしても、このような現象が実際にどの程度「危険」であるのか、極めて幅の広い見方ができるだろう。長いタイムスパンでリスクの重み付けも大きな課題である。氷床崩壊のタイミングとそれが起こる期間は数百年から数千年に及ぶだろうが、それについても不確実性が大きすぎて何を「危険」と見なすか合意できない点であろう。例えば期間に関し、氷床崩壊による海面上昇が1000年間に1メートル（毎年1ミリ）であれば費用はかかってもこれを管理することは可能であるが、100年間に1メートル以上（毎年10ミリ以上）の場合には適応はきわめて困難になる。しかし現在の科学では氷床崩壊の期間に関する確率を得ることはできない。

このように、不確実性ゆえ、氷床崩壊を「DAI」と決められたとしても国際的合意が困難なことがよくわかる。

2) 費用便益アプローチ

山口委員長の発表では、UNFCCC第2条にある究極目的の「経済開発が持続可能な態様で進行することができる」という点にも着目し、「この意味は仮にDAIを回避するレベルに温室効果ガスを安定化できたとしても、それがあまりに急激で費用がきわめて高く、経済が持続的に成長しない場合には第2条の目的を達したとは言えないということである」と指摘している。この観点からDAIを測るのが費用便益アプローチであり、これは気候変動対策の費用（GDP損失）と、対策の便益（対策により発生を免れる環境損害）の金銭換算をもとに、グローバルな経済厚生最大化を目的とするものである。

本調査研究委員会での発表では時間の関係により、費用便益アプローチへの詳細な言及はなかったが、本稿でいくつか代表的な研究を紹介する。

先駆的な研究はNordhaus (1994)のDICEモデル（Dynamic Integrated model of Climate and the Economy）である。世界規模の消費による効用最大化を目的関数と置き、エネルギー起源排出量と気候変動（温度変化）の関係を示した簡単な気候関数、排出抑制の費用関数と、温度変化による世界GDPへの損害を示した損害関数（便益）を制約条件としてお

り、BAUケース（対策なし）、最適ケース（効用最大化）、政策導入ケースなどいくつかのシナリオにおける排出削減量、そのときの削減費用と便益を示している。

DICEモデルを初めとする多くの温暖化統合評価モデル（IAM）研究は短期的なGHG排出削減はごくわずかにとどめるのを最適（社会的に費用最小）、とする。DICEモデルによると、世界全体における最適な排出削減量は2025年においてBAU比の11%減の130億トン、2075年にはBAU比13.4%減の190億トンとしている。ここで想定したBAUとは対策なしのケースであるので当然上昇していくことを前提としており、1985年の75.3億トン（炭素換算）に対し2025年には約2倍の146.2億トン、2075年には3倍弱の219.6億トンである。したがって濃度安定化に必要とされる「長期的な大幅削減」では世界経済に大きな損失をもたらすUNFCCC第2条と相容れないものとなるであろう。

前項で紹介した容認範囲アプローチの研究における大規模かつ不連続な事象（図表1-1のV）を考慮すると費用便益分析の結果は変わるであろうか。上記のNordhaus(1994)は損害係数を変形しこのような「極端な事象(extreme events)」を考慮し、3.25度の温度上昇でGDPの損失が60%にもなるようにモデル化した。しかし、このような想定をしても、短期（90年代）の最適削減レベルをBAU比9%減から17%減にしたのみであった。

Mastrandrea and Schneider (2001)は、この「大規模かつ不確実な事象」をTHCの停止と定義し、それを考慮すると短期的な最適排出削減量は従来のIAM研究が示すよりも大幅に増えると指摘している。すなわち、THC崩壊による世界GDP損失を10%から25%、純時間選好率を1.5から3.0%とすると、短期的に大幅な排出削減をすることが「最適な政策」となりうるとのことである。しかし、THC崩壊が実際どの程度の世界GDP損失をもたらすか不確実であるうえ、ある程度高い割引率を仮定するとTHC崩壊による損害の現在価値が小さくなるため、THC崩壊を将来もたらしような排出パスが社会的に最適となる。このように各種パラメータの仮定により結果が大きく変わる。したがって費用便益アプローチによって、我々が避けるべきDAIを客観的に決定することは不可能である。

そもそも、温暖化問題に費用便益分析を用いること自体に懐疑的な意見が多い。Azar(1998)はこの点に関して、低確率だが一度起こると破局的な影響のある事象の扱い、非市場財の金銭換算手法、割引率、意思決定の判断基準²の4つの論点を挙げており、これらのそれぞれにおいて価値判断に基づいた前提が立てられなければならない、最適化モデルで得られる政策オプションはこれらの前提によって大きく異なると指摘する。

つまり、費用便益アプローチで客観的にDAIを定義することも、それを防ぐための排出削減量を決定することもできない。それよりもむしろ、政策決定者は限られた資源で温暖化問題やその他多くの社会問題に対処しなければならない、その際費用便益分析を限られた政策資源を効率的に配分するためのひとつの重要なツールとして用いるべきであろう。

² 費用便益分析によってある政策の社会全体の便益が費用を上回ることが示されるため「効率を改善する」と言えるのは補償原理に基づく。補償原理の判断基準は、カルドア基準であるがこれによれば、「その政策によって得をする人が、損をする人に損失の補償をしても、まだその政策による便益がある」場合である。しかしながらこのような補償は実際には行われない。

1. 2 排出量の長期的で大幅な削減の必要性

このように、国際的に温暖化対策の最終的な「目標」について具体的な合意の得られぬ状況である。一方、UNFCCC第2条の規定する濃度安定化について、それがどのレベルであっても、長期で大幅な排出量の削減が必要とされる。

例えば、大気中CO₂濃度を産業革命以前の約2倍である550ppmのレベルでの安定化(現在約370ppm)を2150年までに達成するには、2030年から2100年の間に1990年の排出量を下回り、2100年には世界全体の排出量は現在の規模を大幅に下回っていなければならない(IPCC2001)。また、同評価報告書のベースとなっているIPCCの排出シナリオ報告(SRES)では、経済の拡大と人口増加によって、世界のエネルギー起源CO₂の排出量は、格段の対策をしなければ2050年までに現在の2倍になるという。このような中、経済に大きな損失を与えることなしに長期の大幅な排出量削減を達成するにはどうすればよいだろうか。ここで鍵となるのは「技術革新」であろう。革新的技術の開発とその大幅な普及がなければ大幅な削減は困難であることは間違いない。本調査研究では、果たして今の京都枠組みから長期の技術開発を促せるか、そうでなければどのような国際枠組みが必要であるか検討することを大きな目的とする。技術開発、実証、導入、普及(RDDD&D)の可能性と限界の正確な認識をし、可能性を実現するための適切な戦略・政策を検討した。

参考文献

- ・山口光恒(2006a)『『危険な人為的干渉(Dangerous Anthropogenic Interference : DAI)』を巡る議論と当委員会での技術開発の検討のアプローチ』第1回調査研究委員会発表資料、2006年7月28日
- ・山口光恒(2006b)「合意のない気候変動政策の目標と長期戦略」『国際問題』No.552、2006年6月、日本国際問題研究所
- ・Azar, C. (1998), "Are Optimal CO₂ Emissions Really Optimal? Four Critical Issues for Economists in the Greenhouse", *Environmental and Resource Economics* 11(3-4), pp.301-315
- ・IPCC(2001), "Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability", Cambridge University Press
- ・Mastrandrea and Schneider (2001) "Integrated assessment of abrupt climatic changes", *Climate Policy* 1:433-449
- ・Nordhaus, W. (2004), *The Economics of Climate Change: Managing the Global Commons*, MIT Press
- ・Parry, M., Amell, N., McMichael, T., Nicholls, R., Martens, P., Kovats, S., Livermore, M., Rosenzweig, C., Iglesias, A., and Fischer, G. (2001), "Millions at risk: Defining critical climate change threats and targets," *Global Environmental Change*, Vol. 11, pp. 181-183

第2章 長期的な大幅削減のために

本章では、濃度安定化にはどのような技術がどの程度必要なのか、モデル研究を参考に検討を試みる。研究委員会第1回会合の藤井委員の発表を2.1節で、第3回会合のナキセノビッチ教授の発表を2.2節でまとめ、委員会での議論をもとに政策への含意を論じる。

2.1 世界エネルギーモデルを用いた温暖化の統合評価 (MG3)

統合評価の目的は将来のエネルギー技術動向の予測ではない。むしろ、所与のエネルギー需要、GHG濃度制約のもとで、どのようなエネルギー技術を導入するのが最適（費用最小）であるか検討することで、人間社会の持続可能な開発のためのエネルギーシステムの方角を示すことにある。本節では藤井委員の開発された世界地域細分化モデル (MG3 : Model Generation 3) での統合評価を論じ、政策への含意を考察する。

MG3は世界規模のエネルギー工学モデルであり、そのインプットデータは学術文献や各国政府のレポートをもとにしてできるだけ客観的なものとしている。そして、2100年までの最適なエネルギーシステムの開発経路を計算する。ここでの最適とは様々な物理的、経済的制約を満たしたうえで費用最小のシステムを指す。外生的に与えたエネルギー総需要 (IPCCSRESのB2シナリオ³を用いた(図表1-2))、CO₂濃度制約 (エネルギー起源CO₂のみで550ppmv)のもとで、費用最小を達成するエネルギーシステムを分析した。

CO₂排出量の削減技術オプションは大まかに以下の3つに分けられる。

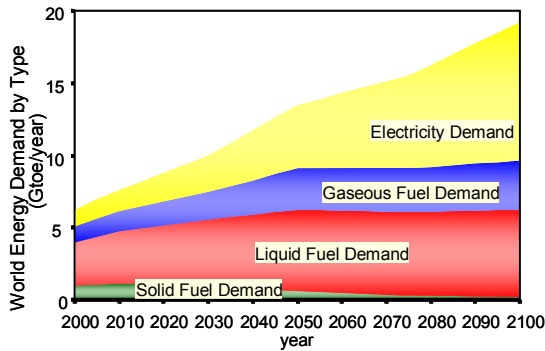
第一は省エネで、最終消費段階での省エネ及び、発電所の効率改善を含む。最終消費段階での省エネは、トップダウン的に需要関数を求めてモデルに組み込んだ(図表1-3)。地域ごとのエネルギー需要関数、基準需要と基準価格を与えて、需要の価格弾性値をもとに表現した。この部分の費用とは、消費者効用の損失を指す。つまり、省エネに伴う損失で、エネルギー消費を我慢することによる経済的な効用の損失やエネルギー効率の設備投資が含まれる。これらは分離できないが全体で1つの費用と見なす。さらに、発電効率の向上については、図表1-4のような効率改善の仮定を燃料別に組み込む。

二つ目はエネルギー転換で、炭素集約的な化石燃料からそうでないものへの転換 (例：石炭から天然ガス)、化石燃料から再生可能エネルギーや原子力発電への転換など、個別のエネルギー供給技術である。化石燃料資源については、現在の埋蔵量とその地理的分布とともに、枯渇に近づくにつれ価格が上昇するという供給曲線を仮定しモデルに組み入れる。再生可能エネルギーは完全なデータではないが、世界の地域分布と費用を技術ごと組み込む。

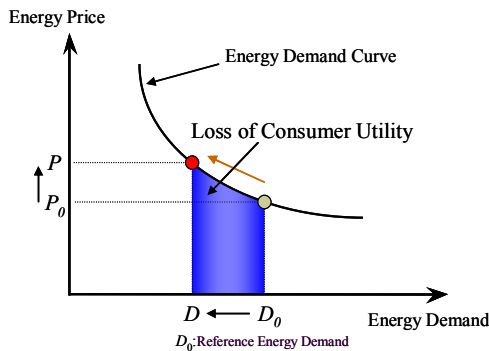
最後はCO₂回収貯留技術である。発電所など大量のCO₂を排出する設備でCO₂を回収し、それを地中貯留もしくは海洋貯留により大気中から隔離するものである。CCS技術についても将来にわたって技術変化を外生的に仮定する。

これらの技術を当統合評価モデルの制約条件としてモデル化した

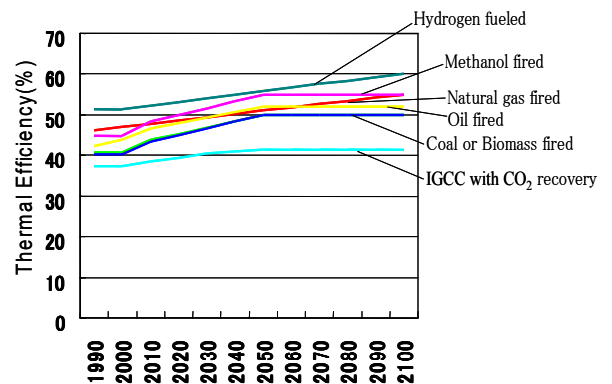
³ SRES シナリオの詳細は第二部第2章を参照。



図表 1-2 MG3 で前提とした世界のタイプ別エネルギー需要



図表 1-3 エネルギーの需要関数



図表 1-4 前提とした発電効率改善

モデル分析の結果は図表1-5及び1-6に示す通りである。CO₂排出制約のないリファレンスケースでは石炭の資源が豊富で安価なことから割合が増え続け、21世紀終わりには一次エネルギー生産の約半分を占めることとなる。石油生産のピークが過ぎると非在来型石油も姿を現す。原子力は既設の寿命が終われば新たに建設しないのが最適となり、やがて姿を消す。一方、CO₂の大気中濃度を550ppmvで安定化するという（=2100年まで550ppmvを越えないという）制約を与えると全く異なるエネルギーシステムが描ける。炭素含有量の多い石炭が甚大な影響を受け、ほとんど伸びない一方で、石油の割合はほとんど変わらず天然ガスは微増する。バイオマス、太陽光も550ppmv制約の下では導入が進む。原子力は一度衰退を見せるも、21世紀後半に再び導入が進む。原子力発電の上限は世界全体で1,500GWという制約を与えている。現在の全世界の原子力による発電出力が約350GWであるので今後4倍ぐらいの規模にまでは増えることができるだろうという大まかな予想に基づく。1,500GWまで普及が進むと、ウラン資源はほぼ枯渇してしまうと予想されるので、バイオマスと同程度に増やそうとするなら、高速増殖炉や現行の軽水炉ではない新しい技術が必要であろう。

発電量の割合で特筆すべきことは、550ppmv制約を与えると、石炭火力発電所がほとんどなくなる事、それに代わってCCS付のIGCC（石炭ガス化複合発電）が導入されること、

その他の火力発電所（天然ガス、バイオマス）にもCCSが設置されることである。太陽光発電の割合も高い。太陽光発電は2050年ごろまで年率3%以上で費用が下がると仮定しており、そのころになると現行の火力発電所より安く発電できることになるが、間欠性の問題があるので、全体の15%を上限としている。

以上のレファレンスケースと550ppm制約ケースのエネルギーシステムのCO₂排出量を示したものが図表1-7である。棒グラフ部分がエネルギーシステムからの排出量または貯留量で、折れ線グラフが大気中に排出される正味の量を示す。550ppmv制約ケースでは発電部門で発生するCO₂はほとんど大気中に排出されずに回収され、地下滞水層や排ガス田への地中貯留、もしくは海洋貯留される。「化学工程からの排出」とは、メタノールや水素を製造する過程で排出されるCO₂を指す。最終需要の段階で不特定多数の消費者がエネルギーを消費することによって排出されるCO₂が「最終消費からの排出」の部分である。

また、レファレンスケースではCO₂排出量は22-23ギガトンまで増加する。一方、550ppmvケースでは12から13ギガトンに抑制される。削減分には、省エネルギー、燃料転換、CCSが約三分の一ずつ寄与する。なお、このモデルで450ppmv制約ケースを分析したところ、技術的には可能であるが、バイオマスの割合が更に増えそこからのCO₂を貯留するという正味マイナスの排出量となることである。

この分析結果では早期の排出削減は効率的ではないとの結果であるが、これは割引率を5%と仮定しているためで、より低い割引率を採用すると早期の削減量が多い結果（図表1-7右の“正味排出量”の線の描くピークが低くなる）となる。なお、同分析での対策費用は、その時点での価値換算では21世紀の後半ほど増加し、GDPの3-4%程度となる。

この分析から、CO₂濃度の安定化にはある特定の技術だけでは費用効果的に達成することができず、省エネ、エネルギー転換、CCSのあらゆる技術の大幅な普及が必要であることが分かる。しかしながら、各技術につき外生的な仮定がなされており、この点現実的であるか議論の呼ぶところである。例えば、現在存在しない技術（変化）の2100年のコストを議論することの妥当性、省エネについてはボトムアップではなく需要関数を導いてトップダウンで仮定が置かれていることの妥当性、PVについて分析結果が示す2100年のエネルギー供給を達成するのに必要な面積とその実現可能性、PVの原料となるシリコンの逼迫した需給状況の諸点である。モデル分析の仮定においてもそれぞれの技術の限界を検証することが説得力のある結論導く上で重要である。しかしながら、このような「仮定の世界」をいかに現実に近づけるにはどのような政策・国際枠組みが必要であろうかという点で、政策への含意は大きい。

図 1-5 モデル分析結果：世界の第一次エネルギー生産に占める各エネルギー源の割合

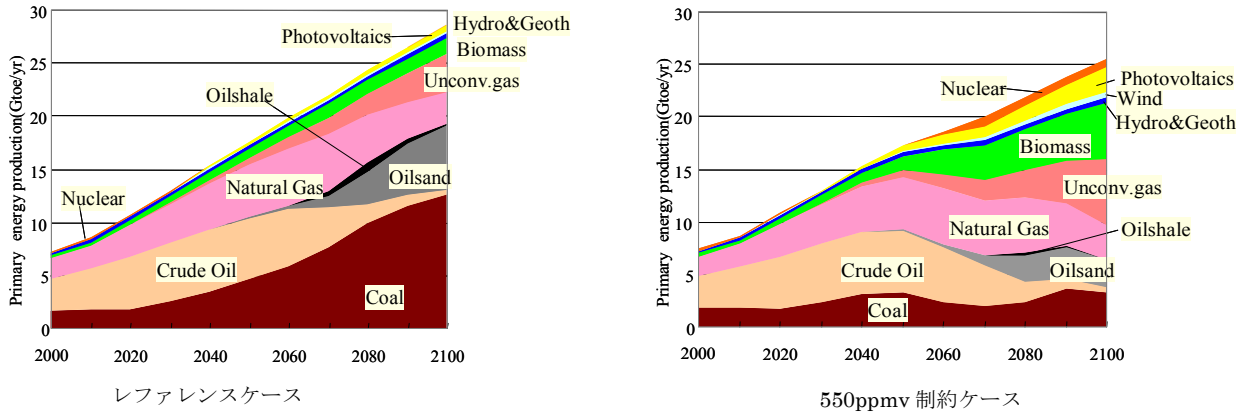


図 1-6 モデル分析結果：世界の発電出力に占める各エネルギー源の割合

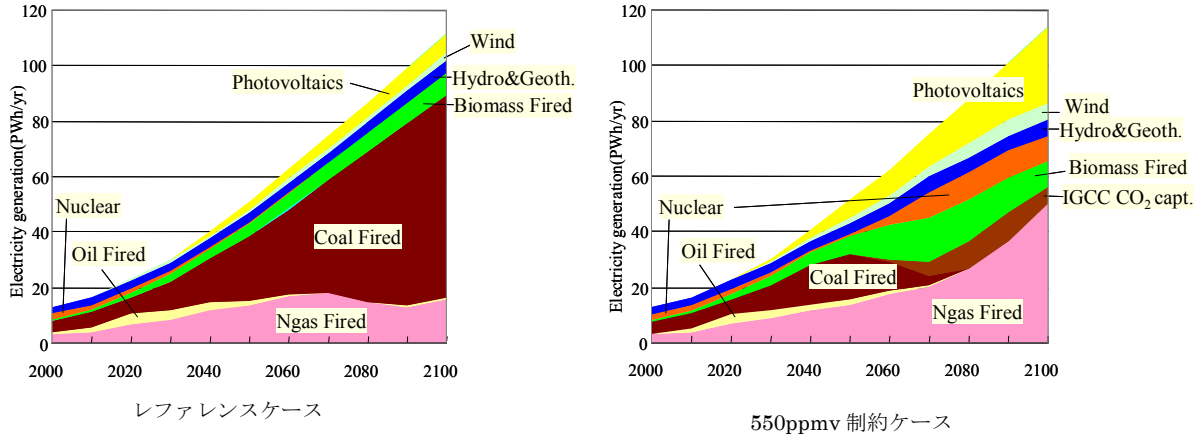
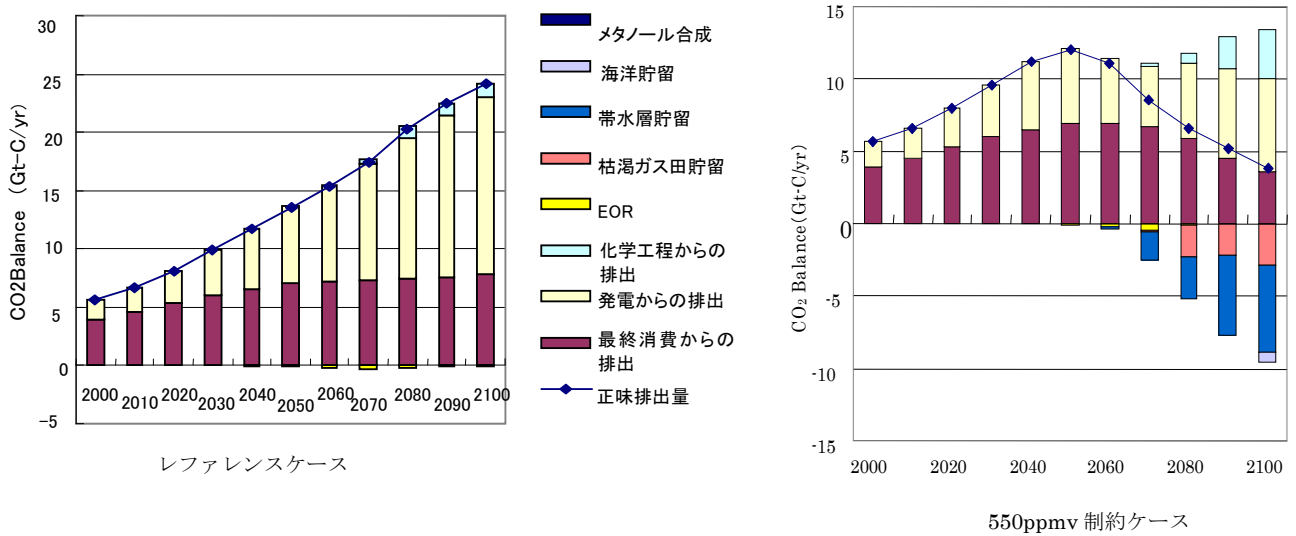


図 1-7 モデル分析結果：部門別世界エネルギー起源 CO2 排出

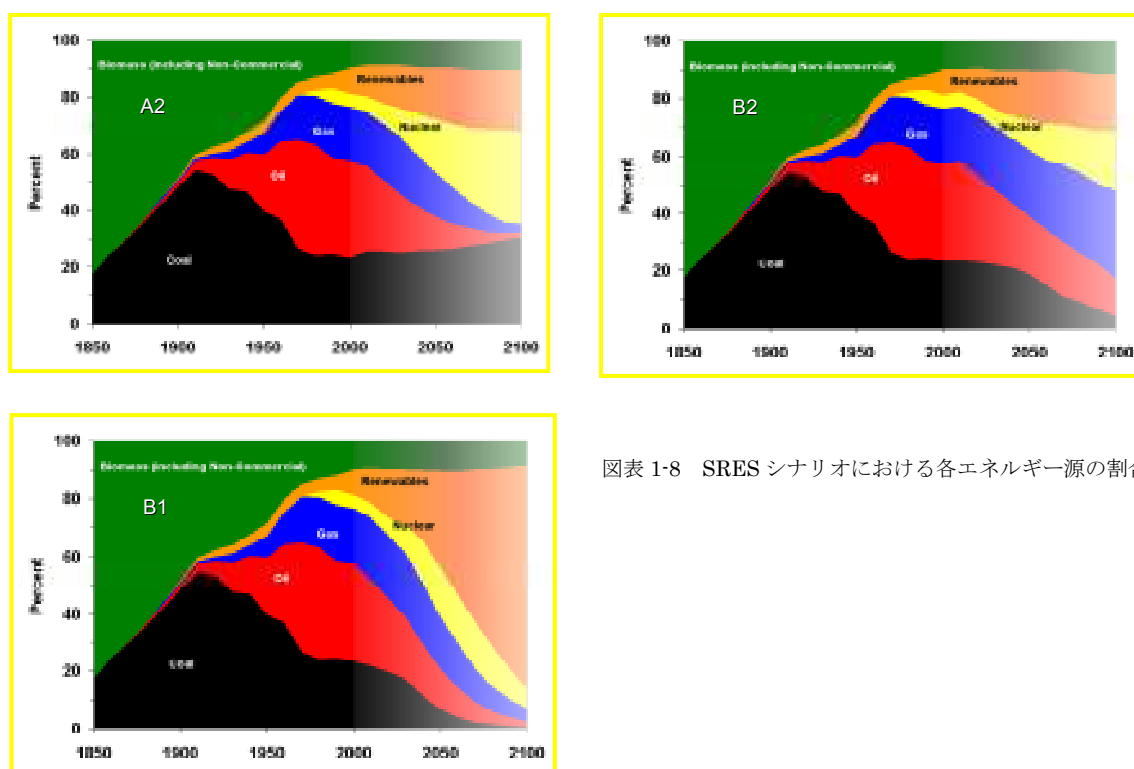


2. 2 IIASAによるモデル分析

調査研究委員会第3回会合においても、IIASAナキセノビッチ教授から前節と同様のエネルギーシステムモデルを用いた分析の結果の発表があり、更に、エネルギー関連投資についても指摘された。長期的視点から見ると早期に脱炭素社会に向けてエネルギー投資をすることが効率的であるとのことである。以下、ナキセノビッチ教授の講演内容をまとめる。

現在も世界人口の3分の1（20億人）がエネルギーへのアクセスがない。その一方で、エネルギーへの需要は増加し、エネルギー安全保障が深刻な問題となっている。大幅なCO₂・GHG排出削減は必要であるが、石炭の埋蔵量は非在来型化石燃料資源とともに在来型石油や天然ガスなどを圧倒しておりエネルギー安全保障と温暖化問題のジレンマとなっている。

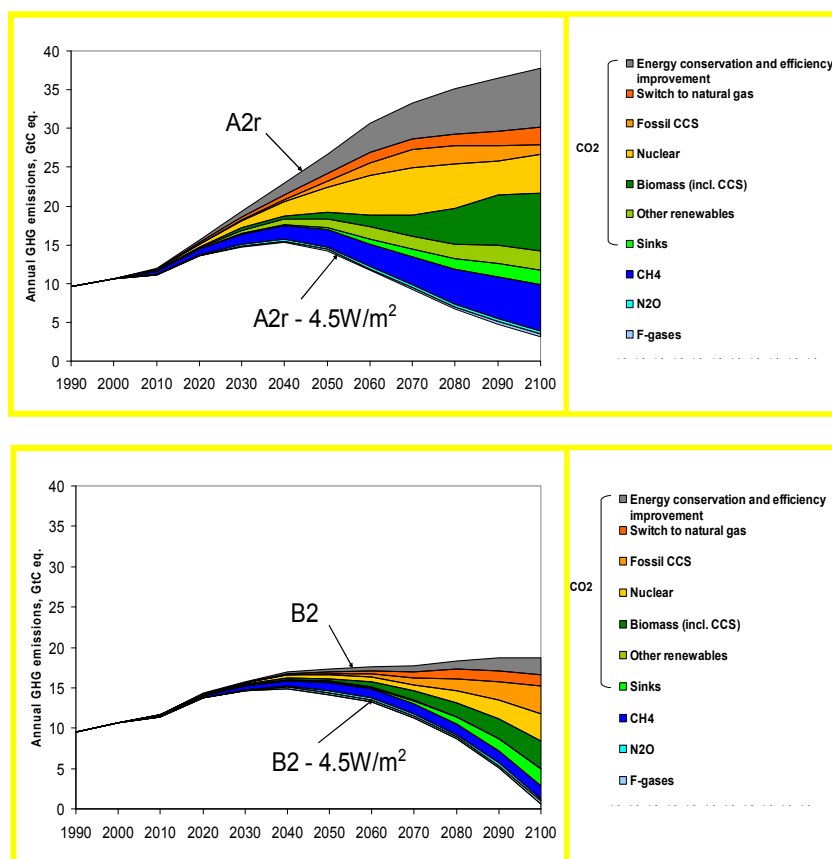
図1-8に示すとおり、IPCCのSRES⁴の各シナリオに対応する一次エネルギー源の構成を比較すると、排出量が一番多いA2（「多元化社会」シナリオ）は2100年でも石炭の割合が現在とほぼ変わらない。一方、「持続可能な発展」ケースで排出量が最も少ないシナリオのB1は再生可能エネルギーが2100年には約9割を占めることとなる。また、シナリオによって在来型・非在来型の天然ガス、石油の消費トレンドに大きな違いがある。



図表 1-8 SRES シナリオにおける各エネルギー源の割合

⁴ SRES シナリオの詳細は第二部第 2 章を参照。

IIASAの統合評価モデルの分析によると、図1-9に示すように、A2rivesed (A2シナリオをIIASAが独自に改訂したもの) シナリオからGHG濃度を効率的に中位レベル ($4.5\text{W/m}^2 \approx 500 \sim 650\text{ppmCO}_2\text{-eq}^5$) に安定化するには⁶、排出量が2040年ごろをピークに、2100年には現在の3分の1ほどに減らさなくてはならない (A2rの場合2100年に約37GtC)。排出削減オプションで費用最小となるのは省エネおよびCCS付バイオマスでそれぞれ10GtC弱削減、原子力発電及びメタン削減でそれぞれ5GtC強削減、といった組み合わせである。B2の排出シナリオ (「地域共存型社会シナリオ」中庸なシナリオ、2100年に15GtC排出) から 4.5W/m^2 への安定化パスにのせるにも、同様に幅広いオプションでの大幅な排出削減が必要である。一方、B1シナリオはそのものが 4.5W/m^2 の安定化パスとなるので、温暖化を 4.5W/m^2 程度に抑えるにはB1シナリオの世界を実現することが必要である。



図表 1-9 4.5W/m^2 安定化制約の下での SRES シナリオからの排出削減

⁵ CO_2 以外の GHG も含み、温室効果を CO_2 換算で表している。

⁶ W/m^2 とは放射強制力の単位で単位面積当たりの放射量の変化を表す指標。大きければ大きいほど地表を暖める効果があるということ。

このように、前節のモデル分析と同様、濃度の安定化には幅広い技術オプションの大幅な普及が求められることが分かる。これらの分析では技術変化を外生変数としており、各技術においてコストの低下率が仮定されている。しかし現実には、どの技術のコストがより低下するか、どの技術がより実現可能性があるか、不確実性が伴う。一方、技術は累積の経験の関数として改善する（単位あたりの費用が低下する）ことが観測されており、研究開発、実証、導入(Research, Development, Demonstration, Deployment)への投資とその方向性が長期的なエネルギーシステムのビジョンに大きく関わってくる⁷。

ナキセノビッチ教授は短期・長期の必要投資額にも言及した。

2000年から2030年までにエネルギー部門で必要な温暖化関連投資額は、図表1-10に示すとおり、A2シナリオの場合、 4.5W/m^2 安定化のためには約2000億ドル、EUの2度目標達成に必要な 3W/m^2 レベルでの安定化は不可能とのことである。B2シナリオは 4.5W/m^2 で1000億ドル弱、 3W/m^2 のためには6000億ドル弱必要である。B1シナリオはそれ自体が 4.5W/m^2 に安定化する排出パスを描くため、当該濃度安定化に必要な追加的費用はほとんど必要としないが、 3W/m^2 には6000億ドルかかる。ここで温暖化関連投資とは、従来のエネルギー関連投資に追加的に必要な額を指す。エネルギー関連投資（後述）と温暖化関連投資を区別するのは実際困難であるが、ここでのモデル分析においては、ベースラインの2030年までのエネルギーシステムへの総投資額をエネルギー関連投資とし、温暖化関連投資とは、ベースラインより低いレベルでの安定化のために必要な追加的な投資費用と、エネルギーシステムに必要な燃料費を指すこととしている。

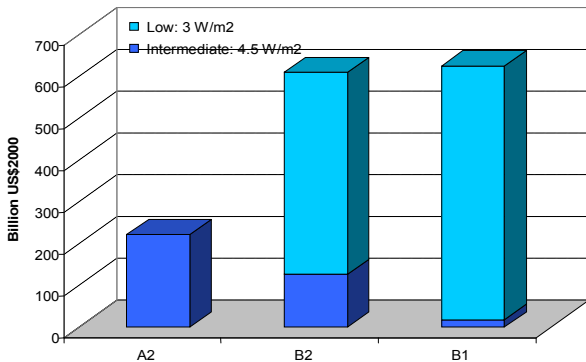
一方、エネルギー投資にはどのシナリオにおいても「兆ドル」の規模で投資が必要である。図表1-11、1-12に必要投資額を短期及び長期で示す。図表1-11のとおり、2030年までに必要な投資額は持続可能な排出経路であるB1の投資額が10%ほど他よりも高いが、おおむねどのシナリオも約20兆ドルである。また、エネルギー投資とくらべると温暖化関連投資はわずかであることが分かる。一方、2100年までの長期を考慮すると、図表1-12のように、150兆ドル（B1）から190兆ドル（A2）とばらつきが見られ、シナリオによって40兆ドルもの違いになる。したがって、長期的なエネルギーシステムにかかる方向性（例えば、B1シナリオのパス）を明確に掲げ、温暖化目標を持つ方が長期的に費用効率的であるだろうことが推察できる。

世界のエネルギー関連投資は実際どのような傾向を示しているだろうか。OECD諸国の公的エネルギー関連R&D予算は1983年に120億ドルであったが、近年は減少傾向にある（図表1-13の黒線）。民間RD&Dは1990年の85億ドル強から現在45億ドルまで減った（図表1-14）。

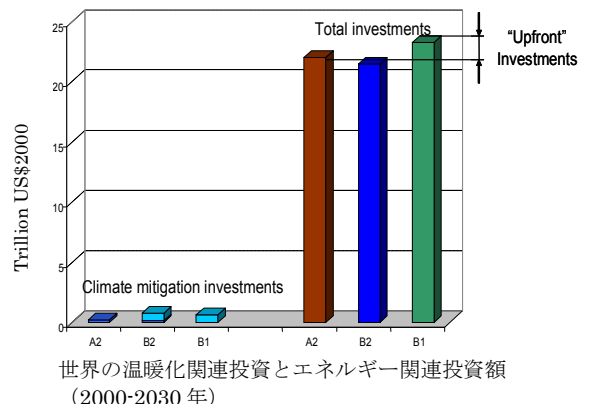
国別では、日本とアメリカの公的R&D投資額が圧倒的で、IEA加盟国全体の70%を占める。比べて、欧州主要諸国の公的R&Dは軒並み低いことが分かる（図表1-15）。

⁷一般に技術の習熟曲線は当該技術の単位あたりの費用と累積設置量の対数関数で表される（詳細は第二部第3章、第4章参照）。

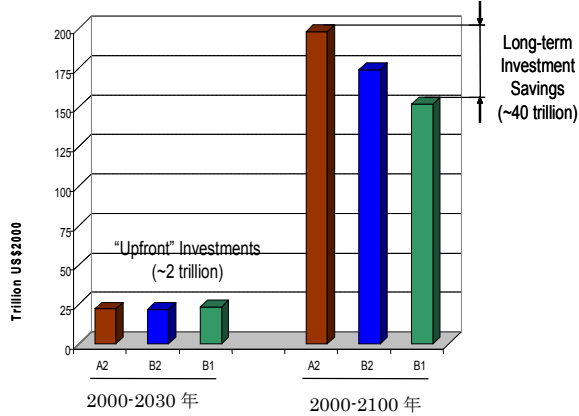
図表 1-10 2000-2030 年における濃度安定化レベル別必要温暖化関連投資額（エネルギー部門）



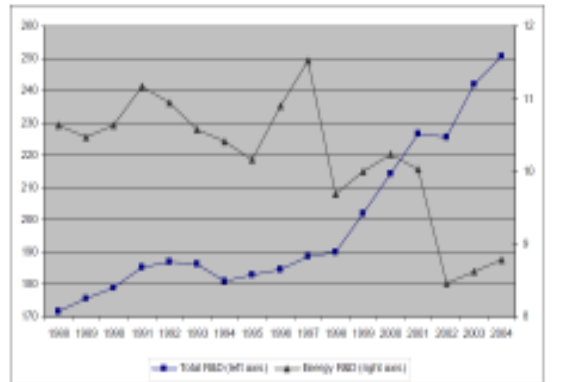
図表 1-11 将来必要とされるエネルギー関連投資額 短期



図表 1-12 将来必要とされるエネルギー関連投資額 短期と長期

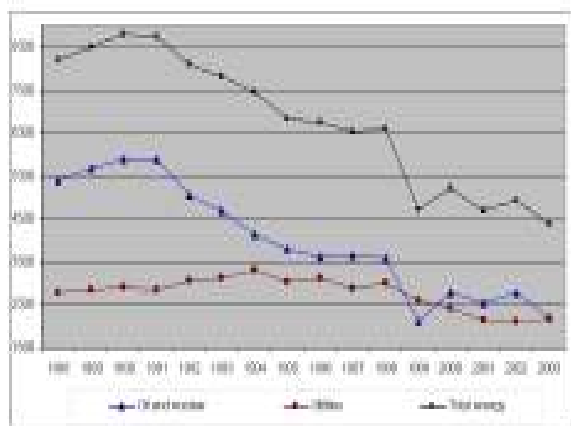


図表 1-13 OECD諸国における公的R&Dの総額(左軸)とエネルギー関連R&D額(右軸)の推移：単位は十億ドル（2004年米ドルPPP） OECD(2006)



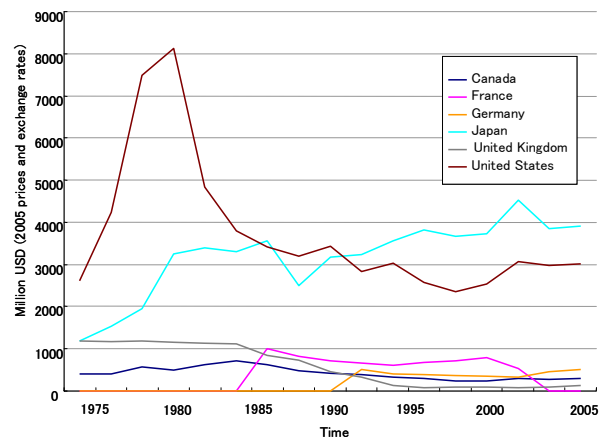
Source: OECD R&D database, March 2006. Total public energy R&D differs from the data in the IEA database because in the OECD R&D database Basic Research is included whereas demonstration projects are excluded and secondly because the group of countries included in the database slightly differs.

図表 1-14 OECD 諸国における民間エネルギー関連 R&D 額の推移：単位は百万ドル（2004年米ドル PPP） OECD(2006)



Source: OECD (IAS) R&D database, March 2007. Missing years are estimated by applying industry-average growth rates. Because no industry database also available GDP deflators have been used to adjust for inflation. Only for the following countries Available: Belgium, Canada, Czech Republic, Finland, France, Germany, Italy, Japan, Korea, Netherlands, Poland, Portugal, Spain, Sweden, UK, USA.

図表 1-15 主要先進国のエネルギー関連公的 R&D 額（山口 2006）



ナキセノビッチ教授によると、エネルギーシステムを新技術・先進技術に移行させるにはエネルギー関連RD&D投資が少なくとも2倍から3倍への増加させることが必要である。一方、エネルギー関連投資全体ではRD&D投資の100倍が少なくとも必要とされる。現在の年間エネルギー関連投資は推定で5000億ドルである。前述のとおり、必要なのは今後30年間で20兆ドルの投資であるが、その計算根拠は以下の通りである：現在世界の電力設備容量やおよそ40億kWである。既存設備からの電力1kWあたりの平均費用は1000ドルなので、設備の更新は単純に考えて約4兆ドルかかる。既存設備の半分は今後30年間に更新される必要があり全容量は同期間に倍増すると仮定すると、計60億kWの設備が約6兆ドルの費用をかけて建設されなければならないことになる。同様の投資が送配電設備にも必要であるので、これを加えると電力投資全体は2030年までに12兆ドルとなる。そしてエネルギー全体の総投資額で考えると2030年までに20兆ドルが必要であるというのだ。

これはおよそ年間1兆ドルということなので、現在の投資額(500億ドル)の少なくとも2倍に相当する。したがって、エネルギー技術とインフラのタイムリーな更新を確実にするにはRD&Dは現在の2、3倍、エネルギー投資は少なくとも2倍必要ということになる。

ナキセノビッチ教授の発表及びその後の議論で論点となったのは政府の役割の重要性である。民間は、エネルギー技術のような、不確実で、かつ長期的に渡って巨額を必要とする投資はリスクが高すぎてできない。明らかに政府の役割である。民間はある程度市場に近くなった技術の導入・普及のための投資において役割を果たすべきであると考えられる。更に、民間の投資を促すために、政府は、長期のビジョンや期待 (expectations) を示すことが重要であろう。企業は現在エネルギーをめぐって、温暖化問題に加え、原油高やエネルギー安全保障といった様々な問題に直面しており、エネルギー投資についてはとてもリスクな決定を強いられている。したがって、今後どのようなエネルギーシステムを構築していくのか、政府の長期ビジョンが求められる。

更に、需要側の政策がエネルギー関連投資を促すかという論点も挙げられた。OECD諸国によっても大きな差があり、図表1-15に示す通り英国は中でも非常に額が少ない。しかし英国の政府関係者は政府R&Dは少なくともEUの排出権取引 (EUETS) の炭素市場に多く投資していると主張するという。ナキセノビッチ教授によると、EUETSは技術革新をもたらしているかもしれないが、エネルギー関連投資は誘発していない。

必要な投資規模の大きさを考慮すると、需要側の政策だけでなく、政府主導の技術政策が必要であることは間違いない。

2. 3 モデル分析の政策への含意：長期的な大幅削減のために

以上、藤井委員とナキセノビッチ教授の発表では、ベースラインから所与の目標濃度レベルを最小費用で達成するためのエネルギー技術の組み合わせの分析を紹介した。

分析の結果をまとめると次のことが言える。まず、濃度安定化を達成するにはBAUからの大幅な排出削減が求められるということ、第二に、それを効率的に達成するには様々な技術の大幅な普及が必要であるということ、第三に、巨額のエネルギー関連投資はどの排出パスでも必要であるが低炭素のエネルギーシステムが長期的に最も安価であるということ、そしてその額はエネルギー関連R&D額とともに現在の2倍以上必要だということである。

濃度安定化を達成するにはどのような政策が必要であろうか。特定の技術ではなく、様々なエネルギー技術の研究・開発・実証・導入・普及を促す政策が必要であることは言うまでもない。現在以上のエネルギー関連投資及びR&D投資が必要であることから分かるように、そのような政策には政府主導の技術政策が含まれなければならない。また、選択する経済社会の形態によって排出量は大きく異なり、更に長期的なエネルギー関連投資の必要額にも大きな差が生じると予測されることから、政府は将来どのようなエネルギーシステムを目指すのか、ビジョンを明確にすることが重要である。そうすることで民間の投資を促すことにもつながる。さらに、エネルギーインフラは一旦設置されると4・50年留まってしまうので、低炭素社会への経路を早期に選択することが必要であり、そのためにも政府の長期ビジョンが鍵を握るのである。

参考文献

- ・ 藤井康正(2006), “Assessment of Global Energy Strategies for the Abatement of CO2 Emissions over the 21st Century”, 調査研究委員会第1回発表資料,2006年7月28日
- ・ 山口光恒(2006), “The Economics of Climate Change: Comments on the Stern Review”, 「温暖化の経済学」シンポジウム発表資料,2006年10月28日
- ・ Doornbosch and Upton(2006), “Round Table on Sustainable Development Do We Have the Right R&D Priorities and Programmes to Support the Energy Technologies of the Future?”, Organisation for Economic Co-operation and Development
- ・ Nakicenovic(2006), “The Role of Technology in Mitigating Climate Change”, 調査研究委員会第3回発表資料,2006年10月20日
- ・ Nakicenovic(2007), IASA-RITE国際シンポジウム発表資料,2007年3月12日

第3章 低炭素社会に必要な技術を実現させる国際枠組みの検討

前章で紹介したモデル分析により、効率的に大気中のGHG濃度を安定化するには、様々な技術の大幅な普及が必要であるとともにそのためには現在以上のエネルギー関連投資とR&Dが必要であることが分かった。これらを実現するにはどのような国際枠組みが望ましいであろうか。調査研究委員会第2回会合の秋元委員による発表「アクションオリエンティッドな排出削減目標と内生的技術習熟モデルによる長期排出削減目標の評価」に基づき、効果的・効率的に技術の開発・普及を進める国際枠組みのオプションの分析を論じる。

3. 1 トップダウンかボトムアップか

第一の論点が、国際枠組みの目標のアプローチである。すなわち、トップダウンかボトムアップという2種類が挙げられる。前者のアプローチの本稿での定義は、京都議定書に見られるように、行動の結果としての排出量の目標を国別に設け、排出削減への取り組みは各参加国にゆだねられる。「市場（需要）主導型⁸」とも置き換えられる。後者のアプローチでは、国全体の数値目標ではなく、国レベルというよりも部門や業種別において燃費基準、排出基準の合意といった排出削減の取り組みに対する約束（ボトムアップ型目標）をするアプローチである。削減への取り組みの結果としての排出量には責任を課さない。「技術（供給）主導型」とも言い換えられる。同アプローチを採用した具体例としてはアジア太平洋パートナーシップ(Asia-Pacific Partnership on Clean Development and Climate: APP)、G8サミットのイニシアティブ、中国・EUやインド・EUのパートナーシップが挙げられる。

APPは約170もの国と地域（EU）が批准する京都議定書とは対照的に地域的に限定された取り組みである。しかしながら、京都議定書で排出量の数値目標を課されているのは附属書I国（先進国）のみである。世界の最大排出国であるアメリカは批准していないうえ、中国・インドといった途上国の大排出国は附属書I国でないため排出義務の削減は課されない。その結果、京都議定書のもとで義務を負う国々（日本、EU、カナダ、ニュージーランドなど）の排出量の総和は世界の約三分の一に過ぎず、その割合は途上国の排出増加に伴い年々低下すると予想される。加えてロシアやウクライナなど旧共産圏のホットエアなど、排出削減義務量の初期割り当てにも問題がある。したがってUNFCCCの究極目標の達成のために、この枠組みは効果的であるかという点に関して疑問がある。一方、上述の通りAPPの参加国はその名の示すとおりアジア太平洋地域に限定されており、6カ国にとどまるが、アメリカ、中国、インドを含む。その結果6カ国だけでも世界全体のCO₂排出量の約半分を占める。加えて、先進国と比較し中国、インドはエネルギー効率改善の余地が大きい。したがって、この枠組みで取り組みが進めば、現在の京都枠組みよりも効果的、効率的な排出削減が可能であると考えられるのである。

⁸ 第二部第1章にて詳細を述べる。

秋元委員の研究は、トップダウン型の京都議定書とボトムアップ型の APP の効果と効率性を DNE+21 モデルを用いて分析・比較したものである。本研究では、世界全体のエネルギーシステムモデルを最小化する動学的な線形計画モデルとして定式化している。世界を国レベルで 54 地域、アメリカや中国などの国土の広い国は更に一国内を分割し計 77 の地域分割を行っている。評価対象期間は 2000 年から 2030 年の 30 年間であり、最適化代表地点は 2005 年から 2030 年の 5 年ごとの 6 時点である。社会経済的要因は IPCC SRES の B2 シナリオ（中位人口成長、中位経済成長）⁹に基づき、2030 年に世界人口は約 84 億（うち APP6 カ国は約 30 億）、世界の GDP は約 75 兆ドル（同約 40 兆ドル）と想定する。最終エネルギー需要（鉄鋼、セメント以外のマクロの需要、後述）についても、IPCC SRES B2 の GDP 当たりの最終エネルギー需要成長率を与える。各種エネルギー資源量も想定を置く。エネルギー供給側技術（各種発電技術、石油精製、石炭ガス化技術など）、二酸化炭素分離・回収、貯留・隔離については、各技術のコストやエネルギー効率などを明示的にモデル化した（ボトムアップ的）。従来の DNE21+ はこれら供給側技術をボトムアップにして、どのようなシステムが最適（費用最小）かどうかを示していたが、本分析はそれに加え、需要側もボトムアップで評価した。つまりエネルギー多消費産業のうち、鉄鋼部門とセメント部門は技術のコストやエネルギー効率なども明示的にモデル化し（ボトムアップ的）、APP のようなアクションオリエンティッドな枠組みの中で、どのような技術を普及させれば削減効果があるか評価した。その他の需要側の部門は、従来どおり個別技術を想定せずに燃料種別に集約したエネルギー需要としてモデル化した（トップダウン的）。

比較・評価するケースは図表1-16に示すとおりである。トップダウン型目標として京都議定書ケースおよび550ppmv安定化ケースを置く。前者はアメリカ離脱のまま第一約束期間の目標が2030年まで継続すること、後者はIPCC WGIのCO2濃度550ppmv安定化パス（S550）を実現することを想定する。そしてボトムアップ型目標としてAPPで発電・鉄鋼・セメントの3部門のそれぞれにおいて効率目標を立てたと仮定し、6カ国のみ排出基準ケースAとケースBを設定した。原単位目標のとり方を変えることによって、国によってどのように有利、不利が生じるか、世界全体の排出削減効果はどうかといった比較ができる。

エネルギー最終消費量、世界全体の粗鋼・セメントの生産量は外生的に与えられる。そしてモデル化した各種技術を制約条件としたモデルで分析することにより、APP6 カ国においてボトムアップ型目標がどのように最適に達成できるか技術の組み合わせが示される。つまり、エネルギーに関しては最終エネルギー需要量を外生的に与えて、最もコスト効率的なエネルギー供給がどうあるべきかを解き、鉄鋼に関しては、それと同時に、粗鋼生産量を地域別に外生的に与えて、それを満たす費用最小の鉄鋼の供給システムがどうあるべきかを解くのである。

⁹ SRES シナリオの詳細は第二部第 2 章を参照。

図表1-16 分析における評価ケースの詳細

ケース名	具体的目標
トップダウン型目標	
京都議定書ケース	2008～2012年の数値目標がそのままその後も（2030年まで）継続（排出量取引無、米国は離脱のまま）
550ppmv安定化ケース	IPCC WGIのCO2濃度550ppmv安定化パスを実現
ボトムアップ型目標（APP6カ国（日本、アメリカ、オーストラリア、韓国、中国、インド）のみ）	
排出基準ケースA	発電：火力平均CO2排出原単位を2030年までに現状日本基準比80%レベルを達成 鉄鋼：高炉・転炉法および電炉法による粗鋼生産のエネルギー原単位を2030年までに現状日本基準比でそれぞれ90%*、100%レベルを達成 セメント：セメント生産のエネルギー原単位を2030年までに現状の日本基準比120%レベルを達成*
排出基準ケースB	発電：全電源平均CO2排出原単位を2030年までに現状日本基準比80%レベルを達成 鉄鋼：全粗鋼生産のエネルギー原単位を2030年までに現状日本レベルを達成* セメント：セメント生産のエネルギー原単位を2030年までに現状の日本基準比120%レベルを達成*

* 既に目標に到達している国には、年0.5%の原単位改善目標を想定

APP6カ国における2030年までのCO2の制約のないリファレンスケースの分析結果を比較する。粗鋼生産設備、セメント生産設備の最適な供給技術オプションを示したのが図1-17及び1-18である。排出基準ケースの方が低・中効率技術の設備容量が減少し、高効率技術がより普及していくことが最適であると分かる。ただし、CO2排出制約がないリファレンスケースにおいても、CO2排出制約がない中でのコスト効率性は追求されるので、高効率の技術がある程度は導入される。国別で見ると（図表1-19）、中国において鉄鋼の省エネ技術であるコークス乾式消火設備（CDQ）と高炉頂圧発電（TRT）が大幅に普及することが分かる。発電構成では、石炭（低効率、中効率とも）の発電電力量が下がり、高効率ガスの発電量が大幅に増えることとなる（図表1-20）。

APP6カ国のCCS回収・貯留量は、より厳しい排出基準ケースBではEOR（石油回収増進法）、ECBM（炭層メタン回収増進法）に加え、（温暖化対策以外に便益のない）リグレット対策である帯水層への地中貯留も2030年には年間3億トン強（炭素換算）実施される（図1-21）。ケースAでは火力平均のCO2排出原単位で目標を設定している（ケースBは全電源平均）、CCSによる効率低下を避けるため、帯水層への地中貯留は導入されない。このように目標のとり方によってどういう技術を誘引するか違いが出る。

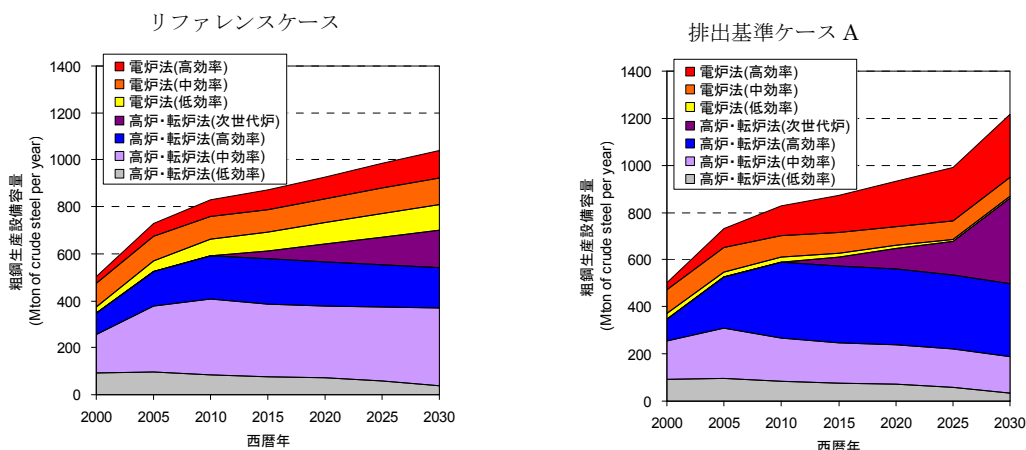
続いて、APP参加国別の排出削減量をリファレンスケースと比較したのが図表1-22である。中国、アメリカが多く、これらの国で削減ポテンシャルが大きいことが分かる。

注目すべきはトップダウンアプローチである京都議定書ケースとの推定排出量（図表1-23）及び費用（図表1-24）の比較である。図表1-23に示すように、APPボトムアップ型目標の2ケースは6カ国の3部門のみの排出基準にも関わらず、京都議定書ケースよりも実

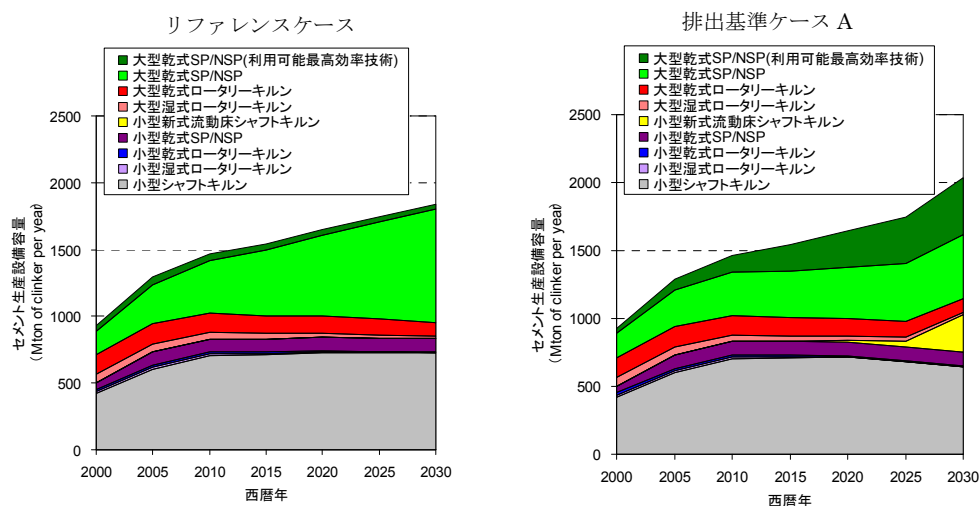
効性が高いことが分かる。例えば、排出基準ケース A によってもたらされる排出量削減量は京都議定書の排出権取引なしのケースより若干少ないものの、同等の効果を有する。排出基準ケース B では 2015 年ごろに削減効果で京都議定書を上回り、2030 年に効果の差はさらに大きくなる。一方で、550ppmv 安定化を最適に実現するために必要な排出削減量は 2010 年ごろから増加し、他のケースをつきはなしていくことから（図表 1-23 赤点線）、いかに大幅な排出削減が必要であるかが分かる。

次に排出削減総費用を比較した。図表 1-24 のとおり、リファレンスケースと比較したエネルギーシステムコストの増分は、排出基準ケース B は京都議定書ケースよりも全体で見ると安価である。アメリカ、中国、インドといった削減ポテンシャルの大きな国が参加するため、京都議定書とほぼ同様の排出削減をより安価に達成しうる。現実的に大排出国が京都議定書の義務を免れている状況では、APP のようなボトムアップの枠組みこそ、効果的、効率的な削減を可能にでき、京都議定書を補完する取り組みとして非常に重要であると思われる。

図表 1-17 APP6 カ国の粗鋼生産設備の導入推移



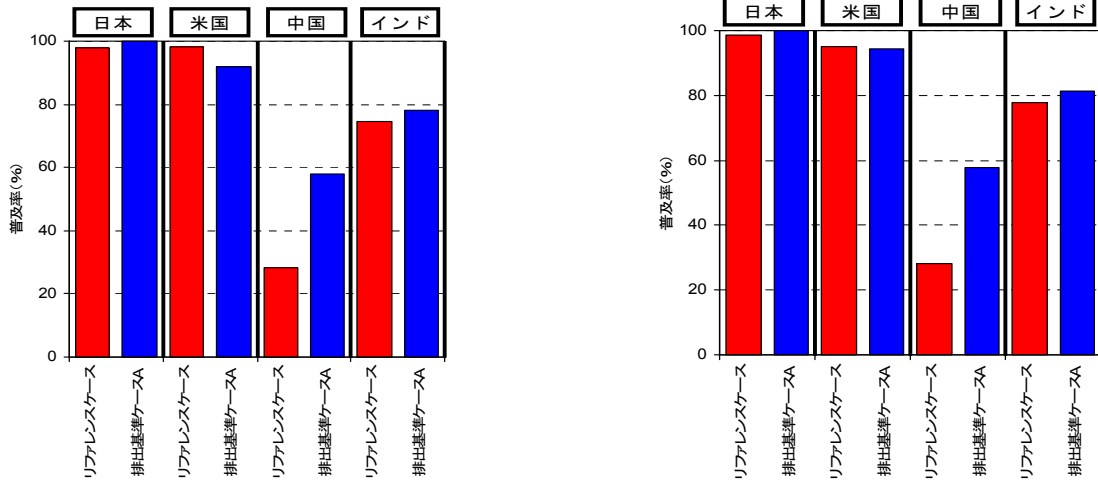
図表 1-18 APP6 カ国のセメント（クリンカー）生産設備の導入推移



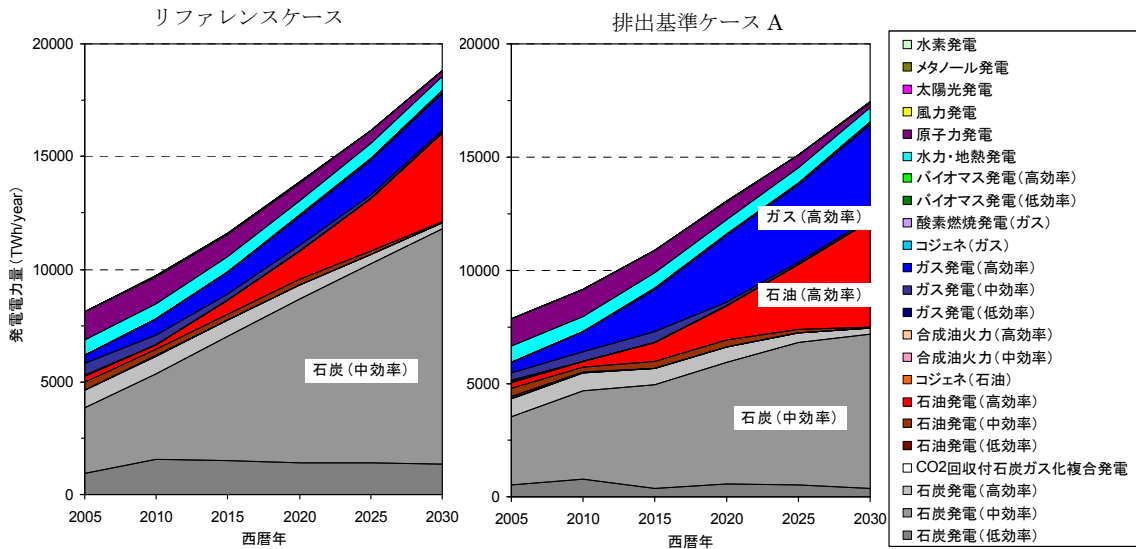
図表 1-19 2020 年における CDQ、TRT 技術の普及率

コークス乾式消火設備 (CDQ)

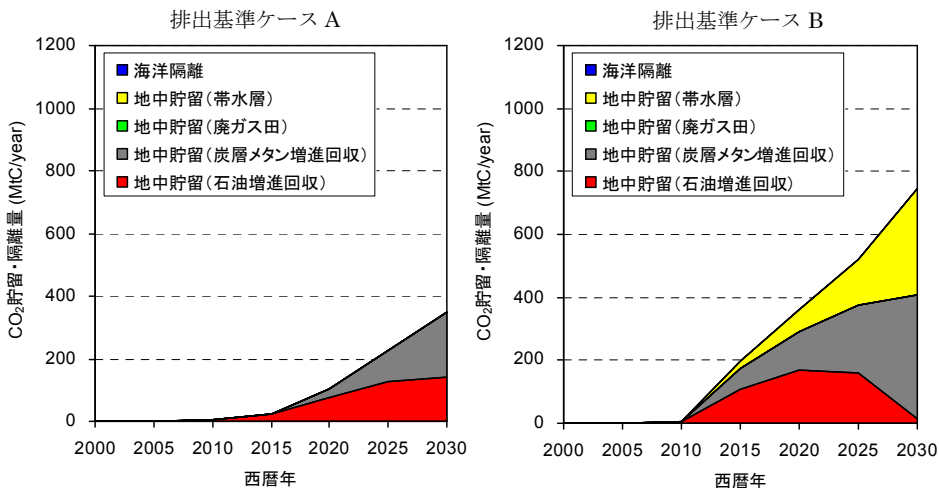
高炉炉頂圧発電 (TRT)



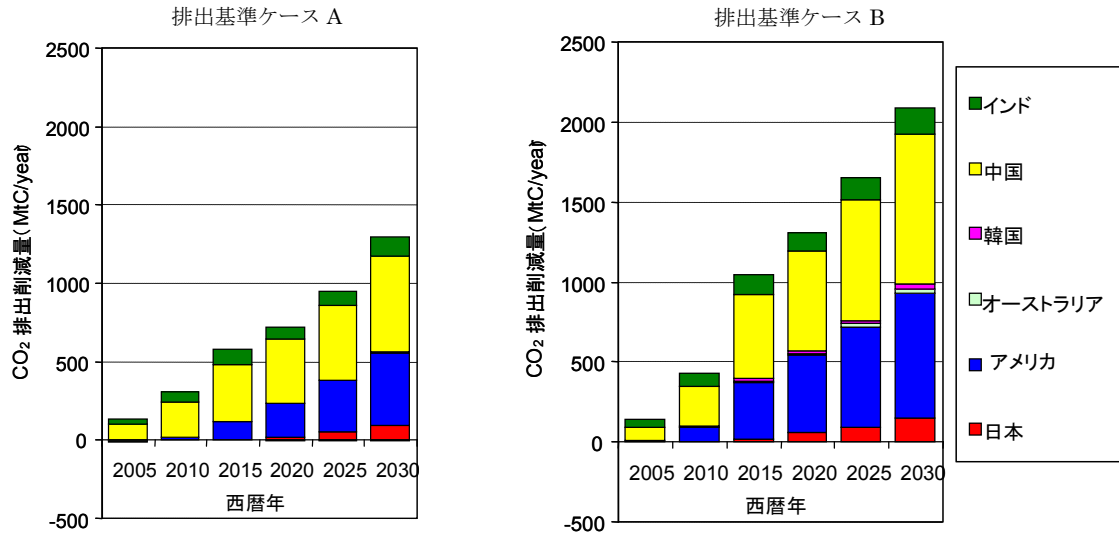
図表 1-20 APP 6 カ国の発電構成



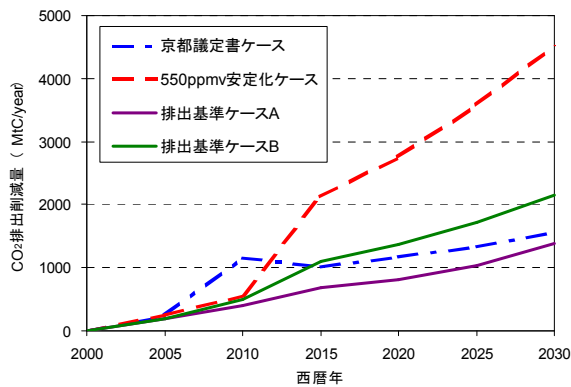
図表 1-21 APP 6 カ国の CO2 回収・貯留量



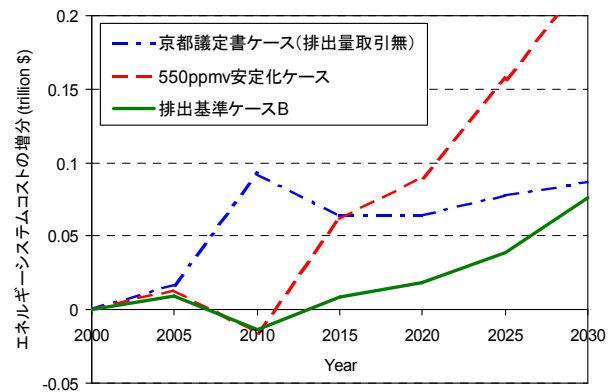
図表1-22 APP6カ国のCO2排出削減量



図表 1-23 各ケースにおける世界の CO2 排出削減量



図表 1-24 各ケースにおける排出削減総コスト



3. 2 長期目標か短期目標か

以上のように、トップダウン・需要主導型の京都議定書を補完する枠組みとしてボトムアップ・技術開発主導型のAPPのような取り組みが非常に重要であることが分かった。

次に分析するのはトップダウン・需要主導型の目標のあり方である。現状の京都議定書のような短期目標か、それとも50年先といった長期の数値目標か、どちらが望ましいであろうか。第1章での議論のとおり、濃度安定化に必要なのは長期的な大幅削減であり、そのためには幅広いエネルギー技術の開発、普及が欠かせない。そして低炭素な社会経済におけるエネルギーシステムは、長期で考慮すると他のシナリオよりも安価であり、それを実現するには政府の長期にわたるビジョンが必要である。本節では第二回調査研究委員会の秋元委員発表の二つ目のテーマ「長期的な排出削減目標の効果—内生的技術習熟モデル

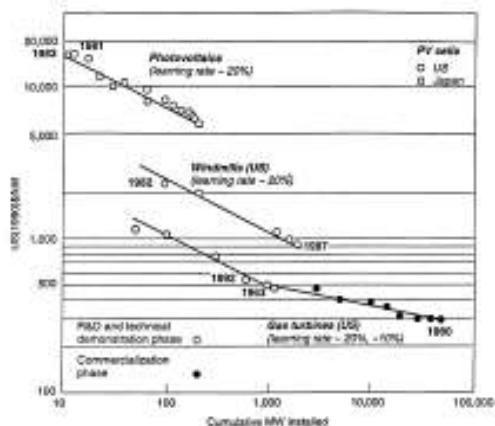
による分析」をもとに将来の国際枠組みにおける数値目標のあり方を検討する。なお、本節の一部は、最新の分析結果について秋元委員にご提供いただいた資料をもとにしているため委員会発表資料と異なる。

京都議定書は1997年に採択、2005年に発効し、第一約束期間は2008年からの5年間である。秋元委員の当研究の問題認識は、このように目標とする時点があまりにも近い将来であると、当該時点におけるコスト効率的な技術選択が中心となりやすいのではないだろうか、一方、4,50年先の数値目標であれば、技術ダイナミクス(将来の技術進展のポテンシャル)を重視した技術戦略を採り易くなるのではないだろうか、という点である。

同研究では、デマンドプル型の目標を、内生的技術習熟モデルを用いて分析した。従来のモデル分析では技術変化は「年率○%の費用減」というように外生的に与えていたが、ここでは技術は累積生産量と共にコストが低減するものと仮定し、モデルに内生的に組み込む。過去の技術革新の例から分かるように、図表 1-25 のとおり、エネルギー技術の累積設置量とコストには相関関係が見られる。

そして技術習熟を内生化した動学的最適型(2050年の長期目標設定ケース)と、10年ごとの逐次最適化型(京都議定書タイプの短期目標を繰り返すケース)を比較し、どちらが効率的、効果的であるか検討する。モデル評価対象期間は2100年までであるが、ここでは2000年から2050年を見ていく。技術習熟については風力、太陽光、バイオマス発電、コンバインドサイクル(CCGT)、CO2分離回収技術(燃焼後回収、燃焼前回収、酸素燃焼発電)、CCS付石炭ガス化複合発電(IGCC)、燃料電池自動車などについて、内生的な技術習熟(累積生産量が倍増したときの単位コスト低下率)を考慮した(図表 1-26)。ここで技術習熟率とは累積生産量が倍増したときの単位コスト低下率である(したがって例えばCO2付IGCCは累積設置が倍増すると単位あたりのコストが7%低下する、ということである)。そしてエネルギー供給(発電部門等)、CO2回収・貯留技術を、ボトムアップ的に(個別技術を積み上げて)モデル化した。

図表 1-25 過去の技術習熟の例



Gritsevskiy and Nakicenovic (2000)

図表 1-26 技術習熟率の仮定

CCS付IGCC	7	バイオマス発電	3
天然ガスコンバインドサイクル	5	バイオエタノール	4
水素発電	7	CO2化学回収	5
燃料電池	15	CO2物理回収	5
風力	13	酸素燃焼発電	7
PV	20	水電解	5

単位：生産量倍増時の単位コスト低下率

技術習熟率の仮定が1%異なると、最適なエネルギーメニューの結果が大きく異なることもある。また、R&Dの初期段階の技術や生産量が伸びていない技術（例：CCS）の習熟率の仮定をどうするかも問題である。しかし、本分析の趣旨は、長期的な目標を掲げる場合と短期目標の場合のどちらが技術革新をもたらすかを検証することであるので、ここでは技術習熟率の精緻な検討に主眼は置いていない。

内生的技術習熟を考慮することによって、ある長期目標のもとではそこに至るまでに技術を習熟させることがコスト効率的であるので、早期に温暖化対策技術の導入を図ることになるのではないかと。一方、京都議定書のような短期目標の場合、まず近い時点でコスト効率的な技術が選択されるのではないかと。本分析では後者を「逐次最適化」という手法で表す。「逐次最適化」とは、まず2010年の目標を置いて、2010年を最適化する。その結果を用いて、2020年を最適化する。さらに2020年の結果を用いて2030年を計算する。このように最適化を繰り返して短期目標を検討する。習熟率やモデル化の際のコストも長期・短期の評価において同一のものを用いる。

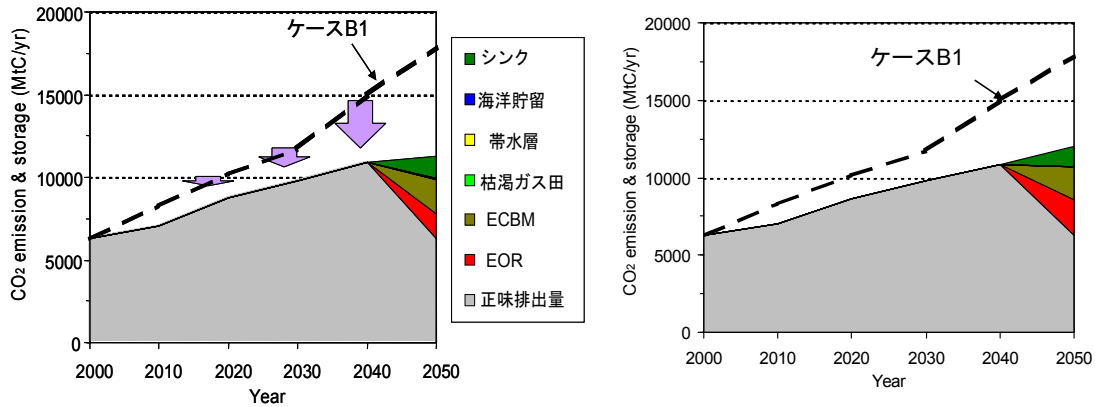
評価ケースを図表1-27に示す。2050年の長期目標を検討するため、2050年に2000年のCO2排出量と同レベルに抑える長期排出削減目標ケース（A2）、およびA2と同じ目標でモデル化した全ての技術に対して高い習熟率を想定した高技術習熟ケース（A3）、CO2排出制約のないリファレンスケース（A1）を設定した。短期的目標の検討には、リファレンスケース（B1）及びA2ケースで得られた排出量推移の10年毎（2010、2020、2030、2040年）の排出量を当該時点の制約とし（したがってA2とB2の排出経路は同じである）、2050年には2000年の排出量レベルに抑える短期連続排出削減目標ケース（B2）を想定した。

図表1-27 分析における評価ケースの詳細 時間選好割引率：3%/yr

ケース名	具体的目標
動学的最適化型モデル（内生的技術習熟モデル）	
リファレンスケース：A1	特段のCO2排出量制約なし
長期排出削減目標ケース：A2	CO2排出目標：2050年に2000年排出量レベルとする
高技術習熟ケース：A3	CO2排出目標：2050年に2000年排出量レベル、高い技術習熟率（一律+3%）
逐次最適化型モデル（10年毎に順に最適化）	
リファレンスケース：B1	特段のCO2排出量制約なし
短期連続排出削減目標ケース：B2	CO2排出目標：ケースA2で計算結果として得られた2050年に至る排出量推移を各時点毎の排出量条件とする

分析の結果は以下の通りである。図表1-28左図にあるように、2050年にCO2排出量を2000年レベルにするという制約をかけた場合、動学的最適型の内生的技術習熟モデルによる計算結果では2050年時点のみの排出制約ではあるが、技術習熟を誘引するためと、設備寿命の対応のため、2050年以前から大幅な排出削減を実施することがコスト効率的な対策となる。温暖化対策以外には便益をもたらさない「リグレット技術」であるCCSは2050年の最後の時点だけで導入する。

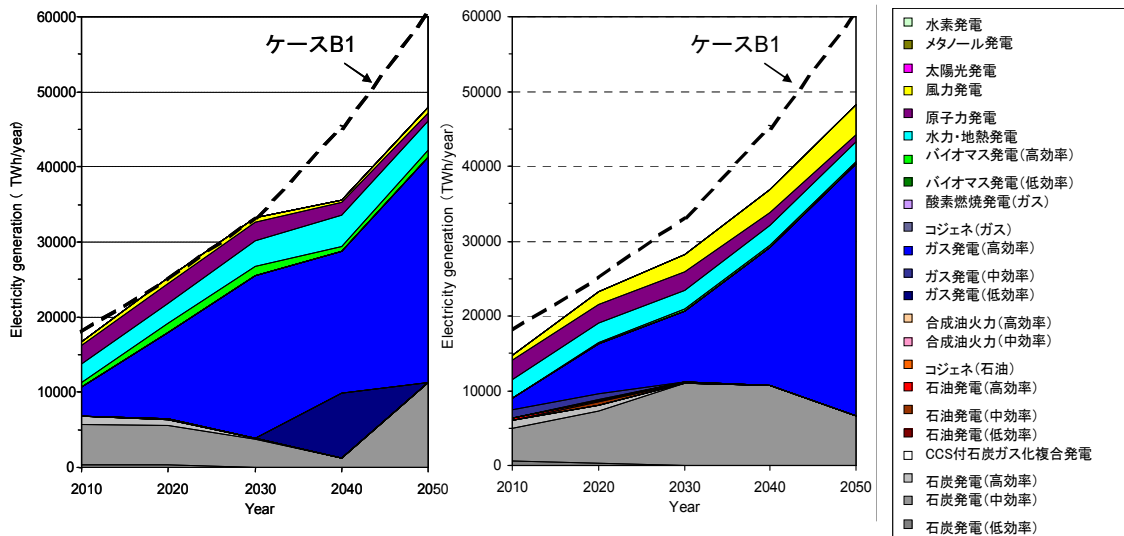
図表 1-28 CO2 排出量と CCS 利用量 長期目標 v.s. 短期連続目標



ケース A2：長期目標
(内生的技術習熟・動学的最適化型モデルによる)

ケース B2：短期連続目標
(外生的技術習熟・逐次的最適化型モデルによる)

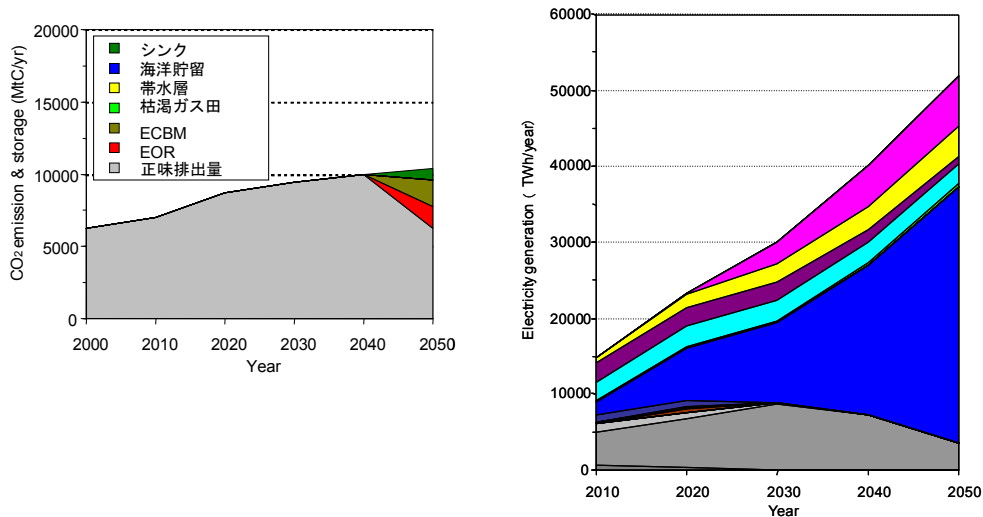
図表 1-29 発電構成の比較 短期連続目標 v.s. 長期目標



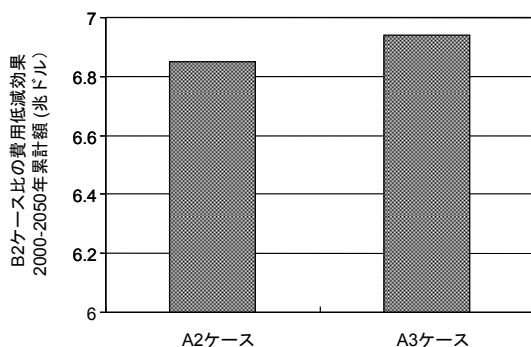
ケース B2：短期連続目標
(外生的技術習熟・逐次的最適化型モデルによる)

ケース A2：長期目標
(内生的技術習熟・動学的最適化型モデルによる)

図 1-30 高技術習熟ケース (A3) における CO2 排出量と CCS 利用量(左)および発電構成(右)



図表 1-31 短期連続目標と比較した長期目標のコスト低減効果



ケースA2で得られた排出量推移を用いて、ケースB2で各時点の排出量制約としてモデル計算を実施したのが図表1-28右図である。発電構成については、図表1-29のとおり、長期目標のもとでは(図表1-29右)、短期目標(同左)と比べ、風力など現在コスト高でも習熟率が高く将来大きな役割が期待できる技術の導入が促進され、また、低効率のガス発電が導入されない傾向がある。高技術習熟ケース(A3)では図表1-30のとおり、技術習熟の可能性により費用効果的な技術の組み合わせは変わり、風力発電に加え太陽光発電の導入が進む。

このように内生的な技術習熟を考慮すると、長期的な排出削減の枠組みが技術開発促進により有効であることが示される。同分析はコストも検討している。図表 1-31 のとおり、長期目標の場合、短期連続目標(B2)と比較して、同じ排出削減量を実現するにも関わらず、50年間の累積で7兆ドル程度の費用低減効果があり得るとの結果が出た。つまり京都議定書のような短期的な目標であると短期でのコスト効率的な技術が選択される傾向であるのに対し、例えば本分析で検討した2050年の削減目標といった長期的な目標を掲げることによって、将来の技術進展のポテンシャルを重視した技術戦略をとりやすくなり、結果として低コストで排出削減が達成できるといえる。ただし、50年先の長期目標のみでは民間部門の具体的な行動に結びつかない可能性があることには留意が必要と考えられる。これを避けるためには、Pledge的に、時間推移を含めた長期目標を設定するということが現実的な目標として考えられるだろう。

したがって、2013年以降の国際枠組みとして、3.1で紹介したAPPのようなテクノロジープッシュ型の政策とともに、デマンドプル型の長期的な排出削減目標を置くことは望ましいと言えるのではないだろうか。

参考文献

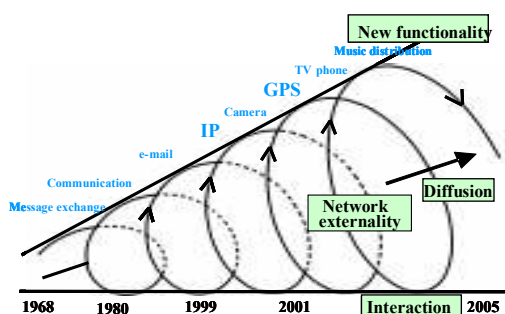
- ・秋元圭吾(2006), 「アクションオリエンティッドな排出削減目標と内生的技術習熟モデルによる長期排出削減目標の評価」, 第2回調査研究委員会発表資料, 2006年10月4日
- ・秋元委員ご提供資料
- ・Gritsevskiy and Nakicenovic(2000), “Modeling Uncertainty of Induced Technological Change”, Energy Policy, 28: 907-921

第4章 技術革新における課題

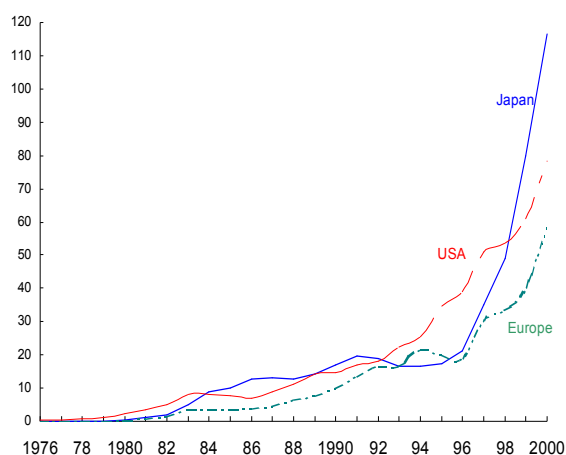
本章では調査研究委員会第4回での東京工業大学渡辺千仞教授の発表と議論をもとに、技術革新のダイナミズムとエネルギー技術固有の論点を論じるとともに、第3章までの議論を通じて今後の検討課題を論じる。

4. 1 エネルギー技術の革新における課題

習熟によって技術はイノベーションの新軌道を描くことができ、継続的学習で成長を維持する。学習効果を通じて当該技術の機能が進展し、技術の限界生産性が向上する。そしてイノベーション向上でGDPが伸び、更なる学習の機会が提供される。累積学習の効果によりさらに成長する。このように、スパイラル的なダイナミズムが存在する(図表1-32)。天然資源に恵まれない日本にとって、その技術力は世界に誇れる生産要素であり、日本は「日本の、日本による、日本のための」技術進歩を遂げてきた。米国、欧州と比較しても、日本が着実に共進化で革新を遂げていたのが分かる(PV生産量の例、図表1-33)。



図表 1-32 技術の機能の進展ダイナミズムのイメージ
(携帯電話の例)



図表 1-33 日・米・欧の PV 生産量の推移 (縦軸の単位は MW)

技術革新の鍵となるのは企業内、企業間の波及効果 (Spillover) である。シャープの太陽電池の例では、企業内にて太陽電池、液晶、携帯電話の技術間の波及効果によって技術が革新した。その結果、同社の太陽電池は京セラを抜いて世界トップのシェアとなった。一方、市場を通じていかに技術の波及効果を自社外から取り込むかも重要であり、例えばキヤノンのように、自社のプリンター技術を半ば提供するような形でPCメーカーを媒介とし共進的發展を遂げる企業もある。

しかしながら、大規模なエネルギーシステム全体で見ると、上記のスパイラル的なダイナミズムや、波及効果による技術革新の促進は起こりにくいと考えられる。理由として以下の3点が挙げられる。

まず、携帯電話やプリンターであれば様々な機能で消費者を惹きつけるような差別化が

可能であるが、例えば電力はエネルギー源が何であれ同じ「電子」という物質を生産するので固有の機能が限られるということである。したがって、価格のみの競争となり、製品の差別化が難しいので、イノベーションが起こりにくいと考えられる。また、天然ガスのコンバインドサイクル技術も異分野（航空機分野）からの波及効果であるなど、エネルギー部門においては自らが大規模な革新を起こすというよりも、他から波及効果を享受するという傾向があるのではないかと考えられる。

次に、プリンターや携帯電話は市場に近い技術である一方、エネルギー分野の技術にはそうでないものが多い。企業にとってエネルギー技術の初期投資のリスクは大きすぎるため、市場に近い技術とは異なり、政府によるR&Dが必要であると思われる。イノベーションが盛んなIT機器などの分野では他社を利用して自社が発展するなどという、企業家精神（*entrepreneurship*）を前提とするが、必ずしも全てがそうではなく、特にエネルギー部門では政府によるインセンティブ付与が必要であると考えられる。

最後に、エネルギーシステムの寿命の長さが挙げられる。携帯電話やエネルギー需要側の技術はサイクルが短い、エネルギー供給側のプラントは寿命が40年から50年にもものぼる。したがって一度設置されるとその後数十年は変わらない。したがって上記のようなスパイラル的なダイナミズムが太陽電池などでは見られる一方、エネルギーシステム全体で見るとそうでない側面もあると考えられ、今後の検討課題となるであろう。

4. 2 今後の検討課題

今後の検討課題として以下の点が挙げられる。

まず、前節で示したとおり、エネルギー技術の革新には他の部門の技術と異なった障害が存在する。政府は第2章で示したような長期ビジョンの策定が求められ、それによって低炭素なエネルギーシステムにロックインするようにならなければならない。また、エネルギー産業はその製品の特質ゆえ非革新的であることから、公的なR&Dが必要であることは言うまでもない

また、国際枠組みへの示唆として、第3章のモデル分析で提案したようなボトムアップ型の行動約束の取り組み、そしてデマンドプル型の取り組みとしては長期目標を掲げることがエネルギー技術の開発・普及に有効であるかもしれない。

さらに、そのような国際枠組みを提案するにあたって、我が国は具体的にどのような究極目標を世界に提案するのか、どのような長期目標や行動約束を自ら進んで負うべきなのか、この点今後の重要な検討課題である。

参考文献

- ・ 渡辺千仞（2007）“Institutional Innovation for Sustainable Development: Japan's Co-Evolutionary Dynamism between Innovation and Institutional Systems“, 第4回調査研究委員会発表資料，2007年1月19日

第二部 関連事項のまとめ

第1章 温暖化・エネルギー関連技術開発をめぐる論点

第1章ではマイケル・グラブ(2005)をまとめ、温暖化・エネルギー関連の技術開発を巡る論点を説明する。

1.1 研究開発主導 (technology-push) と市場主導 (market-pull/demand-pull)

温暖化問題において長期的な GHG 排出削減を扱う際、第一部でのモデル分析のように技術開発についての仮定が決定的な役割を果たす。技術革新のプロセスに関しては 2 つの対立する見方がある(図表 2-1)。

一つは「政府による研究開発主導」論 (technology-push) 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 R&D を促進することで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。したがって、政策への含意としては、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。

一方で、「市場主導」(market-pull/demand-pull) 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。温暖化問題に関しては、技術基準や、GHG 排出量の絶対値規制、環境税といった手法の活用が政府の与えるインセンティブとなる。民間企業はこれらの規制に対応するために、他社との競争で優位に立つために、低コストの GHG 削減技術を開発しようとする。したがって、「市場主導」では早期に排出規制を導入するべきで、導入を遅らせると企業による技術の開発も遅れることになる。

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を示唆するものとなる。実際の政策や国際交渉での立場を見ると、米国は研究開発主導、欧州は市場主導寄りであることが伺える。米国は市場主導の要素を含む京都議定書の批准を拒む一方で、技術の重要性を強調しアジア太平洋パートナーシップ (APP) といった技術中心の国際協力のイニシアティブをとったり、エネルギー関連 R&D へ大規模な投資を行った (p13 図表 1-15 参照) している。欧州は EU 全体の排出権取引や各国での環境税など市場主導型の政策により排出削減を進めようとしている。2007 年 3 月の欧州理事会での長期目標の決定 (EU 2007) も市場主導的要素が強い。

1.2 技術革新の連鎖

以上のように研究開発主導と市場主導のアプローチは全く異なる政策への含意を有する。ここで技術革新の連鎖を概観するが、そのことによって両アプローチは相反するものというより、両アプローチとも、技術革新という複雑な現象において必要であるということが分かるだろう。

図表 2-1 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(technology-push)	市場主導(demand/market-pull)
	技術革新は内在的な傾向と政府の R&D に依存	技術革新は市場の変化に対応するための民間 R&D、学習効果に依存
経済的・政策的・モデルへの含意		
温暖化における長期的な経済的含意	大幅な排出削減は R&D の大きな突破口がない限り非常に費用高となる	技術の蓄積に伴い低費用で可能
政策への含意	政府による R&D	排出量の絶対値目標の設定、環境税、排出権取引
タイミング	新技術が出現しそれにより削減費用が低下するまで削減を遅延	新技術の費用を下げるために早期から削減する
排出量制限「先発者」の経済的優位性	費用のみ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
取り組みの例	アジア太平洋パートナーシップ、G8 プロセス	京都議定書
モデル分析	技術変化は外生的に与えられる(主流)	学習曲線など技術習熟を内生化する

マイケル・グラブ(2005)を参考に作成

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、最近の文献では development (開発)、demonstration (実証)、deployment (導入)、diffusion (普及) など、「D」を追加することで技術革新を分析する傾向がある。グラブ(2005)では以下の6段階を提案している。

1. 基礎的 R&D

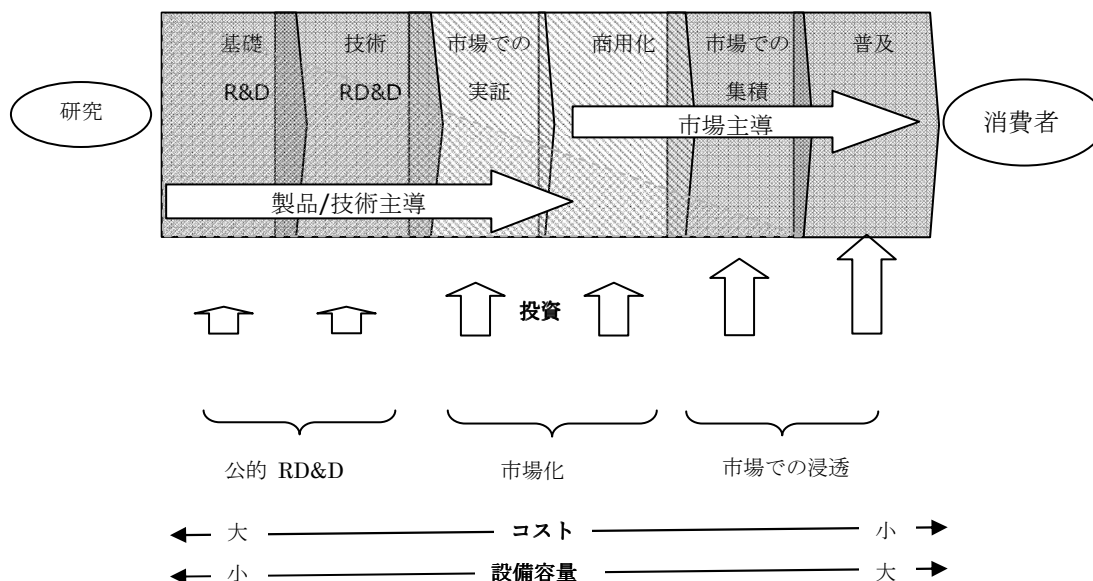
- 2. 新技術に特化した研究、開発、実証 (以下 RD&D)
- 3. 市場における実証 (潜在的購入者・消費者に新技術が実際に機能することを示し、性能、実現可能性、潜在市場を検証)
- 4. 商用化 (既存の企業による新技術の採用、または、当該技術関連の企業を新たに設立)
- 5. 市場の集積 (技術利用規模拡大、ニッチ市場や保護市場での集積を通じて実現)
- 6. 大規模な普及

このような技術革新の連鎖は必ずしも線形ではなく、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るだろう。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ので、各段階で技術の改善とコスト低減がもたらされる。しかし技術革新に対する障壁や原動力となるものは段階を通じて変化する。つまり、「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。

この枠組みで考えると、技術革新の段階によって研究開発主導あるいは市場主導アプローチのどちらが有効であるかわ変わってくる。つまり、政府 R&D の重要性を主張する「研究開発主導」アプローチは技術革新の初期段階に有効であり、技術が実用化に近くなるにつれ「市場主導」アプローチが当てはまることとなる。グラブ(2005)は下記のような図を示し、

財政・公共政策の視点から、技術革新の連鎖を 3 つの要因に表している（図表 2-2）。同図表上の左側が新技術の RD&D 段階であり、ここでの論点は公的 RD&D の財源とその運営に関するものである。一方その対極である右側の普及段階では、民間への投資に対してどのようにリターンをもたらすかが論点であり、政府の需要サイドの政策もそのリターンを左右する鍵となる。その中間段階では公的支援から民間資金への移転をどのようにするか重要である。

図表 2-2 技術革新の連鎖 グラブ(2005)をもとに作成



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。第一部第 4 章で述べたように、IT 関連では技術開発の度合いが非常に高く技術開発への投資額も多いが、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 1%も満たない。

発電部門がこのように「技術開発非集約的」である理由はこれまで述べてきたとおり、長期に亘る莫大な資本投資を必要とするため民間企業にとってはリスクが高すぎるということがまず挙げられる。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。そして、R&D 集約的な業種は競争が非常に激しく、製品の差別化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ことである。特に発電部門及び建物部門において顕著に見られる。つまり、温暖化対策の技術政策は、もっとも革新的ではない産業に急激な技術革新を求めていることと同義なのである¹⁰。

¹⁰一方、石油業界は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で、自動車も製品として競争が激しいので一般的に技術革新は活発であるといえる。

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とのこと、OECD 諸国においても大幅に減少している(p13 図表 1-13)。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。というのも、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)」と呼ばれる。

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という。

1. 3 政策への含意

政府の政策の役割について、技術革新において重要であることは言うまでもない。しかし、その段階によって変化していくことに留意するべきである。

基礎・応用技術 R&D、実証段階において、政府は資金を捻出し、だれでもアクセスできるアイデアの土台をつくるという役割がある。その一方、出資者が報われるような基礎的法的枠組み、つまり、特許の規定を整備する必要がある。市場サイドの政策としては、技術開発企業にそれに応じた報酬を与えることと、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。

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が「市場主導」アプローチであり、これは市場に近い技術に有効である。

しかし、エネルギー産業の技術革新の場合、技術革新の中間段階にある「技術の死の谷」に対応することが難しい。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には十分ではなく、かといって市場主導の力も弱く普及には不十分である。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。つまり温暖化問題の場合、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あらゆる支援を組み合わせた対策をとらなくてはならず、それが今後の課題となる。

参考文献

- ・ マイケル・グラブ,2005,「技術革新と温暖化対策：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,慶応義塾経済学会)
- ・ EU(2007), Brussels European Council 8/9 March 2007 Presidency Conclusions, the Council of the European Union

第2章 SRES 排出シナリオ

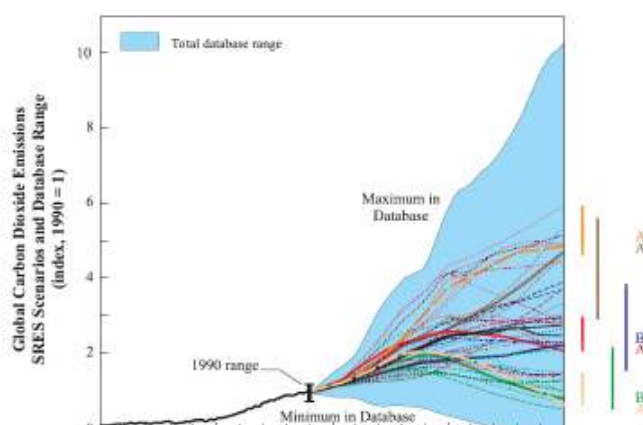
本調査研究委員会の議論で何度も出ていた SRES について概略を説明する。IPCC(2000)、森田恒幸(2001)を参照した。

SRES とは、IPCC(気候変動に関する政府間パネル)が 2000 年に発表した「排出シナリオに関する特別報告書(Special Report on Emission Scenarios)」のことである。ここに示された排出シナリオは一般に「SRES シナリオ」と呼ばれる。

IPCC はそれ以前にも、気候変動、影響、緩和策の分析のもととするために、1990 年と 1992 年に世界の長期排出シナリオを開発していた。しかし社会主義圏の崩壊や一部の発展途上国の急激な経済成長により温室効果ガスの排出量がそれまでのシナリオの方向性を大きく変えることとなり、1996 年に新たなシナリオ開発が決定された。IPCC は既存の学術文献を評価し自ら研究は行わない機関であるが、SRES 開発に際しては IPCC が研究者チームを結成し作成作業が進められた。2001 年に発表された IPCC 第 3 次評価報告書はこの研究の上に成り立っている。2007 年に完成する第 4 次評価報告書も SRES シナリオをもとに、温度上昇といった気候シミュレーションや気候変動の影響、緩和策が評価されている¹¹。

SRES 作成においては、まず既存のシナリオ文献がレビューされた。学術文献から数百の排出シナリオを収集しそのうち 2100 年までを推計期間としている 190 のシナリオを分析した(森田 2001、図表 2-3 青の部分)。これは日本の国立環境研究所で作成されたデータベースに基づく。下図の通り、各排出シナリオの社会経済要因の多様性を反映して、非常に大きな幅の排出量が描ける。このような仮定や推計幅が SRES シナリオの作成過程に反映されることとなる(森田 2001)。

図表 2-3 シナリオデータベースと SRES シナリオ



続いて、独自のシナリオ開発において、最初に、人口、経済発展、社会、技術革新、環境の要因の異なる組み合わせの社会状況を述べる 2100 年までの 4 つの叙事的ストーリーラ

¹¹ 現在、将来作成されるであろう「第 5 次評価報告書」のための、SRES に代わる新しいシナリオを開発するかどうか IPCC で議論されている。

イン (narrative storylines) が策定された。どれも一般的に現在よりも豊かな社会を想定している。温暖化対策なしの BAU シナリオであり、UNFCCC や京都議定書といった温暖化を主目的とした対策は考慮しない。それぞれのストーリーラインのもとで 6 つのモデリングチームが排出量の定量化にとりかかりシナリオを作成した。そのうち 2 つは日本のチーム (国立環境研究所 アジア太平洋統合モデル (AIM)、東京理科大学 多地域資源産業配分モデル (MARIA)) である。当初の分析結果はオープンプロセスと呼ばれるインターネットによる公表と意見聴取を通じて改良された。

合計 40 の排出シナリオが作成された (図表 2-3)。同じストーリーラインをもとにした排出シナリオのグループを「ファミリー」と呼ぶ。以下に概要を記す。なお、SRES では CO₂ 以外の京都議定書対象 GHG であるメタン、N₂O、HFCs、PFCs、SF₆ に加え、モントリオール議定書の規制対象物質である HCFCs 及び CFCs や、エアロゾル、SO₂ なども対象としているが、本調査委員会ではエネルギー起源の CO₂ に焦点を当てているため、本節においても CO₂ のみを取り上げることとする。4 つのストーリーラインの概念図を図表 2-4 に、具体的な社会経済条件を図表 2-5 に示す。

・ A1 ストーリーライン：急速に経済が成長し、人口は 21 世紀半ばでピークを迎えその後減少し、新技術や高効率の技術が急速に導入される社会。世界の地域間の収斂、文化・社会的な相互作用が増し、地域間の経済格差は大幅に低減する。A1 ファミリーはエネルギーシステムの技術変化の方向性によってさらに A1FI (化石燃料集約的)、A1T (非化石エネルギー源)、A1B (バランス型) という 3 つのグループに分けられる。

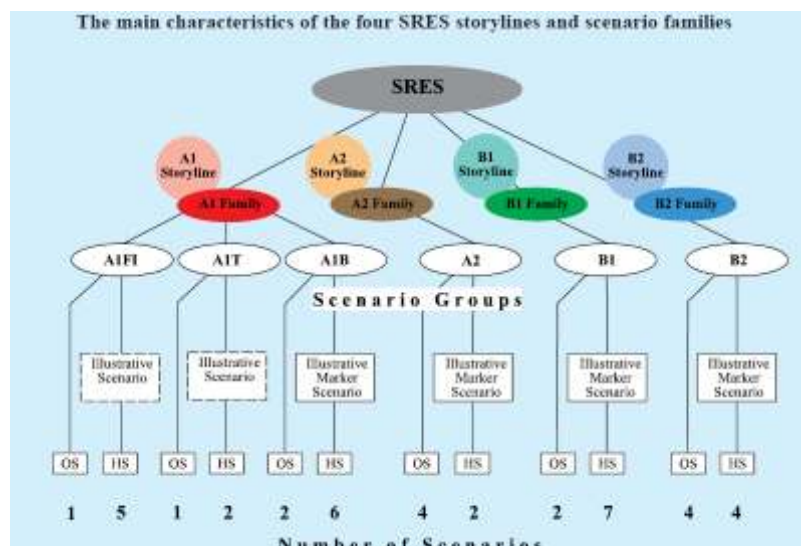
・ A2 ストーリーライン：地域主義のもと世界全体として非常に多様性のある社会。地域間の出生パターンは非常に緩やかに収斂するため世界人口は増加し続ける。経済発展は地域ごとの社会・経済構造をもとに進むので貿易や技術の移転が制限されるため、経済成長や技術変化は他のストーリーラインより緩やかなものとなる。

・ B1 ストーリーライン：A1 と同様の世界人口の推移のもと、経済構造はサービス、情報産業にシフトしクリーンで効率的な技術の導入や移転が進む社会。温暖化対策なしでも経済、社会、環境面での持続可能性に関して世界規模で解決が図られ平衡性が改善する。

・ B2：経済、社会、環境面での持続可能性に関して地域的な解決が図られる社会。A2 より人口成長は緩やかであるが世界人口は増え続ける。経済発展は中位レベルで進み、B1 や A1 と比べると技術変化は緩やかなもので技術移転は国際的なルールではなく 2 国間で別々に進められる。環境保全や社会の平衡性に重きが置かれる社会であるが地域レベルのものである。

図表 2-6 に示されるとおり、シナリオファミリーによって排出量は大きく異なる。B1 のような環境重視の社会では特段の温暖化対策なしでも排出量の増加をとめることができる。経済成長重視の社会でも、A1 と A2 の比較から分かるように、グローバル化が進み、また、エネルギー技術がバランスよく進展すれば排出量の伸びは抑えられる。一方、環境重視であっても B2 の排出量は 2100 年で経済重視の A1 と同等程度である。このように、将来の

排出量は、温暖化対策というよりもどのような社会を選ぶかによって非常に大きな差がでることが分かる。



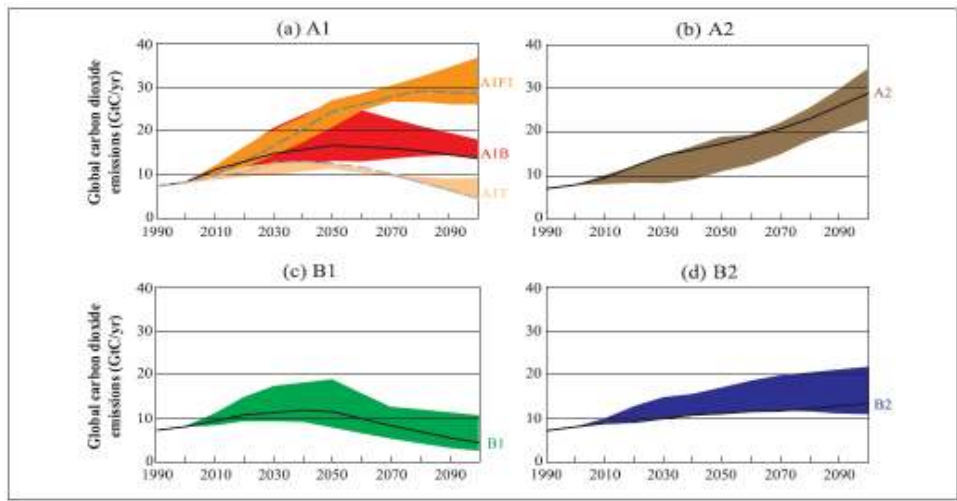
図表 2-3 HSとはHarmonised Scenariosを指し、同一ファミリー内で世界人口、GDPにつき共通の仮定を採用する。エネルギー技術発展の違いをもたらす排出シナリオへの影響を明確にするために、技術変化と経済成長が最も急速に進むA1においてはA1FIとA1Tを設けた。このうちストーリーラインを最も反映しているシナリオを「例示シナリオ(illustrative marker scenario)」として各ストーリーラインのシナリオファミリーから選ばれた。A1FI、A1Tからも例示シナリオ(illustrative scenario)が一つずつ選ばれた。(Nakicenovic 2000) 図 SPM-1



図表 2-4 SRESシナリオの概略図：4つのシナリオファミリーは経済重視⇔環境重視(AかB)、グローバル主義⇔地域主義(1か2)の2つの次元で大別できる(各シナリオの形容は森田2001による)。Nakicenovic(2000)TS-2より作成

図表 2-5 各 SRES シナリオの前提条件 Nakicenovic(2000)

ファミリー		A1			A2	B1	B2
シナリオ	1990 年	A1FI	A1B	A1T	A2	B1	B2
人口(10 億)	5.3						
2020 年		7.6	7.5	7.6	8.2	7.6	7.6
2050 年		8.7	8.7	8.7	11.3	8.7	9.3
2100 年		7.1	7.1	7.0	15.1	7.0	10.4
世界 GDP(兆ドル)	21						
2020 年		53	56	57	41	53	51
2050 年		164	181	187	82	136	110
2100 年		525	529	550	243	328	235
一人当たり GDP 比 (附属書 I 国と非附属書 I 国の比)	16.1						
2020 年		7.5	6.4	6.2	9.4	8.4	7.7
2050 年		2.8	2.8	2.8	6.6	3.6	4.0
2100 年		1.5	1.6	1.6	4.2	1.8	3.0



図表 2-6 全 40 の SRES シナリオの描く世界の CO2 排出量 (エネルギー起源、産業工程、土地利用) 推移 (線グラフは標識シナリオ、A1FI と A1T の点線は準標識シナリオを指す) 図 SPM-3(Nakicenovic 2000)

参考文献

- Nakicenovic and et.al.(2000), “Special Report on Emissions Scenarios, A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change”, Cambridge University Press
- 森田恒幸(2001)「第 2 章 IPCC 排出シナリオ (SRES) に関するサーベイ」、『4つの社会・経済シナリオについて－温室効果ガス排出量削減シナリオ策定調査報告書』、2001 年、環境省地球環境局

第3章 技術習熟内生モデルとは

本章では、最近温暖化関連エネルギー技術のモデル研究で注目を集めている誘発的技術変化(induced technological change: ITC)について説明する。内生的技術習熟、内生的技術変化(endogenous technological change)といった用語は ITC と同義のものとして扱う。

Clarke and Weyant(2002)の関連部分を参考にした。

3. 1 定義

「技術習熟内生モデル」とは誘発的技術変化(ITC)を組み込んだ経済モデルのことである。温暖化モデル、経済モデル一般的において、「技術」とは数学的なインプットとアウトプットの組み合わせを示す「生産関数」を通じて捕捉される。つまり、「技術」が「変化」するには、生産関数が増加しなくてはならない。つまり従来インプット A を 1 単位投入して製品を 1 単位製造していたのが、2 単位製造できるようになるのは生産関数が増加したからであり、それは技術が増加したからである。

技術変化が誘発される(induced)、もしくは内生的(endogenous)というのは、単純に時間の経過に伴う技術の変化（これは技術変化を外生的に捉える考え方）ではない。ITC の概念は、イノベーションの私的費用・報酬が企業や個人の研究開発・イノベーションに大きな影響を与えるという事実を加味することが必要である。例えば「巨万の富を夢見た者がシリコンバレーで IT 関連の技術革新を実現する」、といったように、技術変化は「天から降ってくるもの」ではなく社会経済システムに内生的ということである。そして、ITC の概念のもとでは、技術進歩は厳密には、民間部門のインセンティブによって引き起こされる民間部門の現象である。政府は（環境税などの手法を用いて）インセンティブを操作することによって技術変化のスピードや方向付けを行うことができる。ITC の考え方では、技術進歩は政策に誘発されるというのが大前提にある。環境税や排出権取引だけではなく、公的 R&D や官民の研究パートナーシップといった政府の直接的な役割(R&D 政策)も ITC の概念に含まれ技術進歩を誘発する政策の内に入るが、一般的に ITC の政策への含意としては、民間へのインセンティブ付与として環境税や排出権取引といった需要側の政策が導かれることが多い。

3. 2 技術習熟内生モデル

Clarke and Weyant(2002)では ITC を温暖化モデルで考慮する手法を 4 つに分類している。

①費用関数モデル、②新古典派経済モデル、③異時点間一般均衡モデル、④ボトムアップエネルギーシステムモデルであり、①が最も抽象的で②、③、④に進むにつれ具体的になる。④が個別技術について最も詳細である（第一部第 3 章の秋元委員のモデルは④）。

3. 2. 1. 費用関数モデル

排出量の決定とそれに伴う経済的影響を排出削減量の決定として集約し、外生的に与え

られた排出パスからどの程度削減すべきか示す。技術進歩は生産関数から導かれる削減費用関数の変化として現れる。費用関数は生産関数から導かれる。ITC を考慮すると、削減費用関数の変化は誘発、もしくは制御され得る。例えば、Goulder and Mathai (2002) では、削減費用関数に組み込んだ「知識」のパラメータの変化を ITC として捕捉している。つまり、各時点での削減費用は排出削減量と「知識」レベルの関数となる（削減量が増えると費用も増えるが知識が増えると費用は減る）。

ここで「知識」として、R&D と経験の 2 つが定式化されている。R&D に関しては研究支出が知識のストックを増やす（そして将来の削減費用を低減する）という関係を定式化、経験については、削減を行うほど（経験が増えるほど）技術が進歩するという定式化をする。このような変数の決定をするのは社会計画者(social planner、現実社会では政府の意思決定者)である。同論文はこのモデルを用いて費用効果分析と費用便益分析を行い最適な(最小費用の) 排出削減パスと炭素税のパスを検討した。その結果技術変化を外生変数としたときよりも ITC を考慮した場合には、より大きな短期の排出削減、炭素税レベルが最適となることが分かった。

3. 2. 2 新古典派成長モデル

最も内生成長理論と首尾一貫しており、資本と労働のインプットをもとに技術の全体的な定式化を行っている。温暖化の新古典派成長モデルでは排出の影響を示すインプットを加えて捕捉する。社会計画者が技術の決定をする。

代表例が Nordhaus の DICE モデルであり、これをもとに、ITC を組み込んだ R&DICE モデル(Nordhaus2002)を開発した。これらのモデルでは生産量を労働と資本の関数として表すとともに（つまり労働または資本の投下量が増えると生産量も増える）、温暖化の損害関数も含まれている。損害関数では、排出量によって生産量（一人当たり消費と置き換えられる）が減少することが示される。社会計画者は、一人当たり消費の現在価値を最大化するような、資本投資、炭素排出量、R&D 額を決定する。

Nordhaus は技術変化を二つの要素に分けて考慮している。一つは外生変数として与えられており労働と資本の生産性に関連するものである（新古典派成長モデルではスタンダードな考え方）。二つ目は、生産の炭素集約度における技術進歩で、内生的なものとし、R&D 額と生産性を定式化し捕捉している。

3. 2. 3 異時点間一般均衡モデル

異時点間一般均衡モデルでは経済全体を分野ごとに分け、分野間のインターアクションを含め経済活動全体をモデル化する。分析の対象とする分野の詳細なデータを必要とする。上記 2 つのタイプと異なり部門間の相互作用を考慮できることや実際の市場行動を明確に示せることが特徴である。

Goulder and Schneider(1999)がこのタイプのモデルで ITC を考慮した顕著な例である。

代表的企業は知識の蓄積に資源を投資することによって生産容量の増強を図ることができるが、知識の蓄積からの便益は一部のみ私用化できるので、市場全体としては社会的最適と比べて過少投資となる。最適炭素税は求めず、炭素税や R&D 補助金の様々なレベルの効果を検討している。また、脱炭素のエネルギー部門と従来型エネルギー部門とを分けていることも特徴である。各部門での技術変化の方向に関する仮定をしなければならない。例えば、従来型エネルギー部門の技術進歩はエネルギー消費削減もしくは炭素排出削減にはなりえず、生産性の改善のみとしている。したがって、そのような技術進歩はより安価で汚れた燃料の使用を通じて、排出量を増加させることとなる。さらに同研究では、R&D 資源を革新的な産業に供給する「R&D サービス部門」を含んでいることが特徴的である。したがって、代替燃料の研究費用の増加は他の部門の研究に間接的な影響を与える。つまり、環境 R&D の機会費用を上げることとなる。

3. 2. 4 ボトムアップエネルギーシステムモデル

上に述べた 3 タイプのモデルがパラメータ化された生産関数を通じて技術を捕捉するのに対し、ボトムアップエネルギーシステムモデルはエネルギー部門の個々の技術について具体的である。明示的に個々の技術あるいは、技術のグループ（クラスター）をモデル化する。外生的に与えられたエネルギー需要を満たすために、どの技術をどこで、いつ導入すれば最小費用で達成できるか示すことを目的とする。同タイプのモデルの既存研究では当該技術の累積設置量と単位コストの関数など経験ベースで内部化し ITC を考慮している。

個々の技術を区別することによって、エネルギーシステム全体の特徴の非連続性を示すことができる。非連続性とは、従来競争力のなかった技術が市場の閾値に到達しエネルギーシステムの一翼を担うようになることである。これらの研究によると、エネルギーシステム全体への投資よりも、個別技術の小さなまとまりへの投資の方が長期的な技術変化を誘導する。つまり、イノベーション資源の分配はイノベーション資源そのものの規模と同等に重要である。第一部第 3 章で紹介した秋元委員のモデルや、次章で詳しく述べる Gritsevskiy and Nakicenovic(2002)のモデルもこのタイプである。

3. 3 技術習熟内生モデルの含意

ITC を考慮すると外生的技術変化のモデルとどのように結果が異なるのであろうか。政策への含意も全く違うものになるのだろうか。

少なくとも、ITC を考慮するとそうでないものよりも、排出量が政府の政策に左右されやすい。Nordhaus の R&DICE の分析結果では、技術の漸次的変化である ITC よりも技術の代替の方が重要であると示している。Goulder and Schneider の一般均衡モデルでは、トン当たり 25 ドルの炭素税によって代替エネルギーの R&D は早期に増加するが、従来型エネルギー R&D は急激に減少する。ITC を考慮すると、しない場合に比べて同じ累積削減量を達成するのに犠牲となる GDP 損失はおおよそ 25% も低い。

ITC を考慮すると最適な排出量や環境税はどのように変わるだろうか。外生的技術変化のモデルでは、削減コストは待てば待つほど下がるので削減は将来に先送りされる。費用関数モデルを用いた **Goulder and Mathai** の研究では、もしイノベーションが R&D から発生するならイノベーションのポテンシャルが大きいほど、削減は将来に先送りにすることが望ましいとなる。一方、技術進歩が経験から発生するものであれば削減のタイミングは曖昧となる。将来の削減費用が低くなるのであれば削減は将来に延ばした方がよいが、将来の削減費用は早期の削減量の関数であるので、早期に多く削減した方が将来の費用減につながるの好ましいとなる。**Nordhaus** の R&DICE モデルはタイミングの問題について、ITC は温暖化の経路に軽微な影響しか与えないので最適な排出量と炭素税にも軽微な影響しか与えない、としている。

もう一点政策関連の課題は早期における政府の技術支援の重要性である。**Goulder and Schneider** のモデルは直接 R&D 補助金と炭素税を比較し、炭素税のみの場合に比べて、R&D 補助金の場合、今後 100 年間で 15% の排出削減を達成するに当たって GDP 損失が 9 倍にもなると述べている。したがって同研究では R&D 補助金は炭素税に補完的であっても代替するものではないとしている。従来競争力のなかった新興技術が市場に到達するのは、エネルギーシステムモデルの示すような経験効果を通じてであるのか、それとも R&D 投資を通じてであるかという点に関して結論は同じである。つまり、大規模な技術変化は全く新しい技術の到来によってもたらされると言うことである。後述する **Gritsevskiy and Nakicenovic** の分析では、市場主導による技術経路の局所均衡がいくつもあるということが示されており、市場の動向に関して不確実性が大きいと述べている。つまり、リスクで調整したエネルギーシステムコストが近似で最小の技術ダイナミクスが 520 のうち 53 あるが、53 それぞれのエネルギーシステムの炭素排出量は全く異なる。

いずれにせよ、ITC を組み込んだ温暖化モデル（内生的技術習熟モデル）の研究はまだ発展中であるので、外生的技術変化のモデルよりも大幅に低い削減コスト、異なる最適税率、及び早期の削減を正当化する強い証拠とはなっていない。

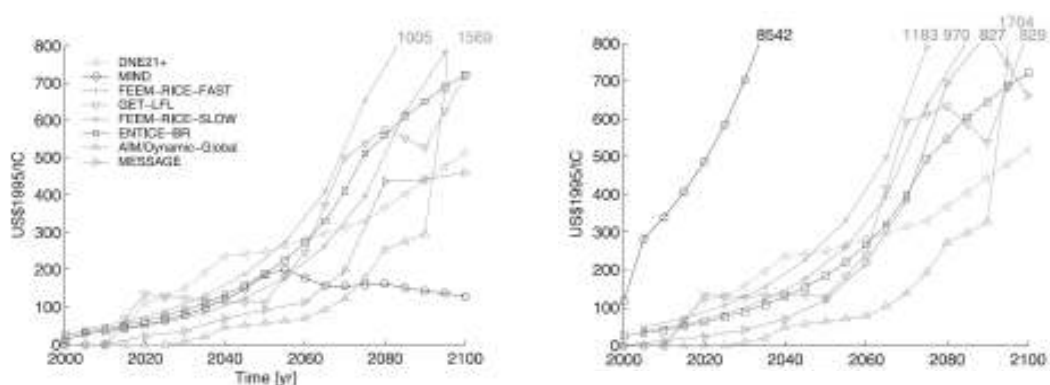
3. 4 ITC の最新動向

同節では第 2 回委員会の秋元委員の発表の一部をもとに内生的技術習熟モデルの最新動向を紹介する。

内生的技術習熟モデルは、90 年代後半から温暖化問題の分析ツールとしてヨーロッパを中心に流行している。2006 年には英国ケンブリッジ大学 **Michael Grubb**、イタリアベニス大学 **Carlo Carraro**、ドイツポツダムインスティテュートの **John Schellnhuber** などを中心となって内生的技術習熟モデルの比較プロジェクトを行った。一連のプロジェクト研究の成果は国際エネルギー経済学会(International Association for Energy Economics)が発行する学術誌 **Energy Journal** の特別号として発表された。

同プロジェクトを統合した **Edenhofer et.al. (2006)**によると、ITC を考慮すると

450ppmvCO₂-eq という低レベルでの濃度安定化も安価に達成可能との結果が導かれる(図表 2-7)。450ppmvCO₂-eq での安定化は EU の掲げる 2°C 目標の達成に必要な濃度レベルであり、EU はこの研究を用いて 2°C 目標は経済に損害をもたらすことなく達成可能であると示そうとしているとも考えられる。2007 年 5 月に完成予定の IPCC 第三作業部会の第 4 次報告書にも下図の分析結果は引用される見込みという。



図表 2-7 450ppmv 安定化シナリオにおける炭素のシャドウプライス：ITC を考慮する場合(左図)及びしない場合(右図) Edenhofer et.al.(2006) p42 Figure10 より

しかし、図表 2-7 を仔細に見ると、実際は1つのモデル (MIND モデル) の研究結果が極端であり、そのために平均をとると、内生的技術習熟のある場合とない場合を比べると費用に大きな差が出たと考えられる。このモデルを除くと削減コストに違いは大きく見られないと思われる。

参考文献

- Clarke and Weyant(2002), “Modeling Induced Technological Change: An Overview”, Ch.12, *Technological Change and the Environment*, RFF Press
- Edenhofer et.al.,(2006), “Induced Technological Change: Exploring its Implications for the Economics of Atmospheric Stabilization Synthesis Report from the Innovation Modeling Comparison Project”, *Energy Journal*, Endogenous Technological Change, Special Issue No.1
- Goulder, L.H. and K. Mathai (2000), “Optimal CO₂ Abatement in the Presence of Induced Technological Change”, *Journal of Environmental Economics and Management* 39, pp. 1-38.
- Goulder and Schneider(1999), “Induced Technological Change and the Attractiveness of Co₂ Abatement Policies, *Resource and Energy Economics*, 21, 211-253
- Nordhaus(2002), “Modeling Induced Innovation in Climate-Change Policy”, Ch8, *Technological Change and the Environment*, RFF Press

第4章 内生的技術変化を組み込んだ分析

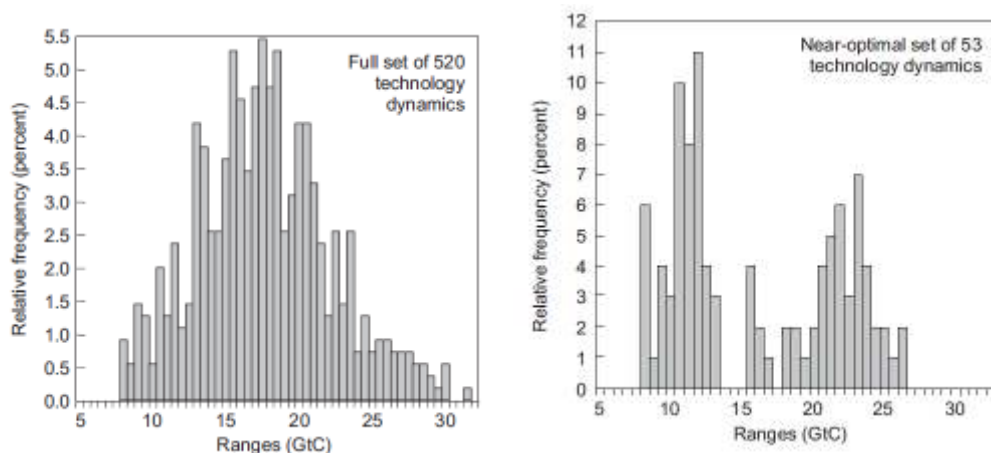
本章では前に説明した「内生的技術変化」を考慮した代表的なモデル研究として、本調査研究委員会でも度々言及されていた Gritsevskiy and Nakicenovic (2000)を紹介する。

同論文では、IIASA の MESSAGE モデルに不確実性を伴う誘発的技術学習(induced technological learning)を組み込み、どのような将来のエネルギーシステムが描けるかを提示している。分析の結果、内生的技術変化を組み込むと、ある一定のエネルギー需要パスを与えたとき、もっとも費用効果的な将来のエネルギーシステムの分布は CO2 排出量の低いものか高いところで頻度が高くなる双方分布を描く (図表 2-8)。

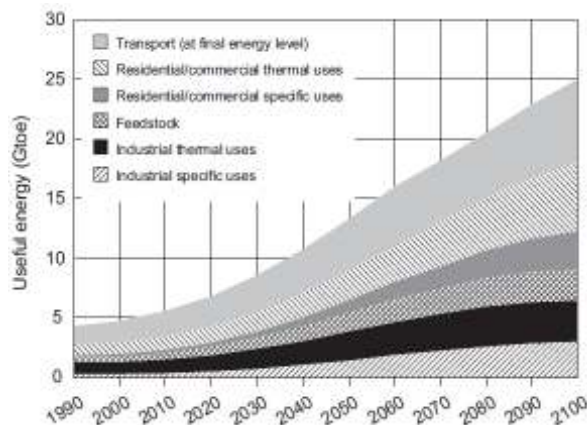
4.1 モデルのアプローチ

世界規模のエネルギーシステムの抜本的な変革はなかなか進まず、移行には数十年～100年かかる。これから将来のエネルギーシステムに向けて、数え切れないほどのシナリオが考えられるがどの方向へ移行が進むのかは現在不確実である。エネルギーシステムの展開(development)の方向性によって温暖化への影響も変わるので、温暖化が深刻になる前に新しいエネルギー技術の十分な経験と普及が必要であるとの問題認識である。

エネルギーシステムモデルに技術学習と不確実性を内生化することによって、技術革新によって可能となる将来の技術変化の様々な方向性を捕捉することができる。同モデル分析では(1)学習効果、(2)波及効果、(3)新旧すべてのエネルギー技術の将来費用の不確実性をモデルに組み込んだ。そして、ある一定のエネルギー需要パス(図表 2-9、SRESのシナリオ群とくらべて高需要)を与え、それを満たすための技術のポートフォリオを導出する。そこには520のエネルギーダイナミクスがあり、そのうち最少費用の53のダイナミクスは、高または低レベルの排出量をもたらすとの分析結果を得た。つまり、低排出のエネルギーシステムが高排出のものより必ずしも高費用とは言えないということである。



図表 2-8 全エネルギーダイナミクスの炭素排出量の分布 (左) 及び最少費用のエネルギーダイナミクスの分布 (右図)



図表 2-9 想定するエネルギー需要

以下、内生的技術変化をどうモデルに組み入れたか詳細を説明する。

4. 2 モデルで考慮した要素

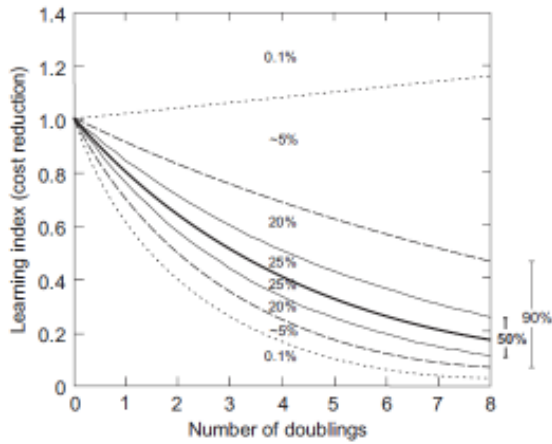
4. 2. 1 学習効果

モデルに組み込んだ第一の要素は、規模に関する収穫逓増と、規模に関する不確実性逓減である。つまり、累積経験(普及規模)が増すと技術が改善し、普及規模が増すと費用とその不確実性が低下する(学習(経験)曲線)と仮定する。

「収穫逓増」とは、普及すればするほど当該技術は改善され、市場ポテンシャルが広がり、当該技術を追加的1単位生産(設備容量拡大)するのにかかる費用が下がるということである。生産性逓増ともいう。投資家へのリスクも下がる。ある特定の技術が普及すればするほど他技術の普及の可能性が小さくなることから、ロックイン効果もあてはまる。したがって、低炭素社会を目指すとするなら、早い段階で低炭素エネルギー技術への投資が必要である。一度方向性が決まったらそれを変えることは難しいのである。

IIASAの技術インベントリにある1600のエネルギー技術の費用や環境上の特性といったデータを活用し、モデルで考慮する既存技術を含むすべての技術について不確実な将来費用を仮定し、費用低下関数を推定した。費用低下関数は、 $CI_t = (2^{-\beta})^{NBt}$ と置いた。左辺は費用低下指標で、 t 時点の当該技術の単位コスト(年間平準化コスト)と基準年における初期費用の比とする。右辺の NBt は t 時点までに達成した累積生産量の増の回数(Number of doubling)、 β は生産量増毎の費用低下率であり、既知の平均値と分散を持ち正規分布をすると仮定し不確実性を組み込む。図表 2-10 は β の期待値が0.2のときの増回数と費用低下の関係を確認率分布で表したものである。例えば、累積生産量が当初の16倍(2の4乗、つまり横軸の $NB=4$)に増加したとき、費用低下インデックス(縦軸)は0.4で単位コストは当初の60%減ることになる。また、図中の%は費用低下率の分布であり、例えば $NB=4$ のとき、費用低下インデックスはおよそ0.3から0.7(縦軸)が統計的に有意(90%)な範囲にあ

ることが分かる。



図表 2-10 累積生産量の倍増回数に関する学習指標で表した不確実性を伴う費用低下。βの期待値が0.2のとき。

4. 2. 2 波及効果

ジェットエンジンとガスタービン技術のように、ある分野の技術の改善が他の分野にも便益をもたらすことがあり、これを波及効果という。明確な技術の分類法が存在しないため、波及効果のモデル化は困難であるが、おそらく技術習熟からの正の波及効果は近似した技術間の方がそうでないものよりも大きいだろう。したがって、技術の近似性の測り方が何らかし必要となる。そこで2つのタイプの波及効果を想定した。第一に、エネルギーシステム内でのエネルギー技術間の間接的な波及効果である。例えばガスタービンのコストが下がると電力価格も下がると考えられるので、他の条件が等しければ電力以外のエネルギーサービスよりも電力の最終消費技術が好まれることとなる。第二は直接的な影響で、近似性の高い技術同士の波及効果である。水素とメタノールの燃料電池技術などである。ここでは明確に近似技術のグループ（クラスター）を設定し、異なるクラスター間より同じクラスター内においての方が波及効果は強いと仮定している。さらに同じクラスターの技術群は全累計生産量を共有し、同じ学習率を持つと仮定している。分析の結果、波及効果を考慮した方が低コストであることが分かった。クラスター間の波及率は技術的な近似性に比例する（固定型や移動型といった各種燃料電池）。つまり、技術へのRD&Dや投資は関連技術のクラスター、あるいは技術クラスターを形成しうる関連技術に焦点を絞り波及効果を有効活用することが望ましいと考えられる。

4. 2. 3 将来費用の不確実性

さらに、将来の技術のコストを過小・過大評価するリスクをモデルに組み込む。約100の技術から成るレファレンスのエネルギーシステムを想定する。従来は、それぞれの技術に対して平準化費用、ユニットサイズ、効率、寿命、排出量をIIASAのデータをもとに与え、様々な技術間のバランス制約に加え、資源の入手可能性という制限も与える。

そして、所与のエネルギー需要を満たすような、割引現在費用を最小化する技術システムの単一解を求める。しかし、長期におけるエネルギーシステムの将来像は幅広く存在するので不確実性（リスク）をモデルに組み込むことが必要である。

同論文では、全く異なる将来のエネルギーシステム構造や将来の技術ダイナミクスについて選択の自由を仮定し、それぞれのシステムの費用の期待値と不確実性の両方で技術ダイナミクスを比べた。問題は極めて複雑であるので、「確率的近似法」を用いて解く（多数回ランダム抽出の操作を通じて解を求めるモンテカルロ法と大きく異なる方法とのこと）。そして、520 の技術ダイナミクスそれぞれから様々なパラメータのセットを抽出し 250 のエネルギーシステムのシナリオを導出した¹²。その結果、520 のうち 53 の技術ダイナミクスが最も低費用であることが分かった。

4. 3 結論

モデル分析の結果、520 の技術ダイナミクスのうち 53 のダイナミクスが非常に低い費用でのエネルギーシステムのシナリオから成り、それらの排出量は双峰分布を示す(図表 2-8 右)。この最小費用シナリオの中には化石燃料にますます依存するものから再生可能エネルギーに完全移行するものまで様々である。つまり、同じ費用でまったく異なるエネルギーシステム構造が可能であるということであり、エネルギー技術の戦略はいくとおりにもありうることである。これらのエネルギーシステムの方向性は経路に依存するので経験とは無関係に最適な方向を選ぶことはできない。したがって、長期のエネルギーシステムの発展の方向を決めるにあたって、不確実性の下では、後になっての決定よりも現在の新技術への投資決定が非常に重要である（一方、技術変化を外生変数として捉えるなら費用が下がるまで待つほうがよいとなる）

つまり、費用効果的に低炭素なエネルギーシステムの構築を長期に目指すなら、現在の投資を低炭素エネルギー技術の方向を向けるような方策が重要である。また、新技術への将来の RD&D や投資は、あるクラスター（関連技術のグループ）のうち 1 つのみの技術にするというよりも、そのクラスター全体に行われるべきで、更には、将来技術の大きなポートフォリオ全体に RD&D や投資をするのではなく、技術クラスターを形成しうる関連する技術に焦点を絞るべきである。こうすることで技術の波及効果を有効に活用できる。

参考文献

Gritsevskiy and Nakicenovic (2000) , “Modeling Uncertainty of Induced Technological Change”, *Energy Policy*, 28: 907-921

¹² 「シナリオ」とは将来のエネルギーシステムの決定論的(deterministic)な状態を指す。2100 年までのエネルギーフロー、設備容量の増加、総システム費用、エネルギー採掘といった全ての活動レベルにおいて特定の値が定まっている。「技術ダイナミクス」とは将来の費用についてなど不確実性を伴う将来の導入でのより一般的特徴を示した指標群（①アウトプット倍増の関数としての不確実な費用削減（ β 値の分布関数）、②将来のあらゆる時点での費用の分布関数、③レファレンスエネルギーシステム内での 10 技術クラスター内・間での波及効果）。一つの技術ダイナミクスから抽出できるシナリオが無数にある。

参考資料 議事要旨

第一回委員会

H18年07月28日(金) 18:00~20:30 GISPRI 会議室

出席者 (敬称略、計18名) 委員長: 山口、委員: 木村、工藤、瀬川、堤、藤井、佐野(秋元委員代理)、オブザーバー: 遠藤、増永、岡本(経済産業省)、事務局: 新井、吉田、信岡、角野、松本、柴田、渡邊

概要

1. 山口委員長より発表 地球温暖化の「危険な人為的干渉 (Dangerous Anthropogenic Interference : DAI)」を巡る議論と当委員会での技術開発の検討のアプローチ

○ 温暖化対策の目標について (現在執筆中の IPCC の AR4 でも執筆者の間で大きな議論となっている)

○ EU の 2 度目標

1996 年の欧州環境理事会で、工業化以前と比べ地球平均気温の上昇を 2 度以内に抑えること、そのためには GHG 濃度を 550ppm 以下に抑えることを明記、

→その後 2002 年の欧州理事会でも、2 度以内と 550ppm 以下での安定化を長期目標とすべきことを明記

→しかし、2004 年の欧州理事会で、UNFCCC の究極目的達成のためには平均気温の上昇を 2 度以内に抑えること、となり「550ppm」が消えた。

→現在 EU は 2 度の確実な達成にはもっと低い ppm での安定化が必要と主張している。その根拠が Hare and Meinshausen(2005)の図。しかしこの分析手法が正しくても、そこで用いた研究が必ずしも妥当であるとは言えない。

○ DAI とは何か。種の多様性、異常気象、WAIS の崩壊や THC の停止、など、測る基準は様々。

容認範囲アプローチでは、水不足や病気などの影響を受ける人口で測ろうとするが、事象の重み付けや、何を持って DAI というかは解がない。

同アプローチで、持続性を基準として測る試みもあるが、何を基準とするかで DAI が異なる。

○ 確率論による DAI 閾値の研究もあるが、どのレベルが「DAI」と決めることはできず、また気候感度に不確実性があるため、EU の主張は政治的なものといわざるを得ない。

→DAI に関する科学的な合意は不可能。しかし、どのレベルで安定化するにも、大幅な GHG 排出の削減が必要。

→100 年後世界規模での排出量を半減するとなると、途上国の人口が増え、経済成長とともに排出量が増加していることを考えると、先進国はマイナス排出が必要となるが、それは

不可能。→技術革新がなければ大幅な削減は絶対無理であろう。果たして今の京都枠組みから長期の技術開発を促せるか。

○ 現在執筆中の AR4 でも 450ppm での安定化が「technically」「economically」feasible か、議論が割れている。何をもちて technically、economically feasible というか。また、追加的な政策をなければ排出量は増え続けるのか、追加的な政策だけでは排出量の削減は不可能で、技術革新が必要なのではないか。一方、450ppm 以下での安定化が不可能のような書きぶりだとの批判も NGO 系執筆者からある。

○ 技術開発、実証、導入、普及 (RDDD&D) の可能性と限界の正確な認識が必要ではないか。→革新的技術出現、DDD の見通しとそれを可能にする国際枠組み
→そのための適切な戦略・政策を当委員会で検討

2. 藤井委員より発表 世界エネルギーモデルを用いた地球温暖化の統合評価

○ エネルギーモデルを用いて、将来予測ではなく、将来こうすべきだ、という方向を示したい。

100 年間の資源制約やエネルギー需要の制約のもと、個別技術を積み上げて全体を表現し、コスト最小化となるエネルギーシステムを求める。CO₂ の制約条件 (550ppm をどの時点でも越えない) も外から与える。

○ CO₂ 排出削減のためのオプション: 省エネ (最終消費での省エネ、発電所の効率改善)、エネルギー転換 (低炭素化石燃料、再生可能エネ、原子力)、CCS→これらをエネルギーモデルで表現する。

○ 2100 年までのエネルギー需要は IPCC のシナリオを用いている。最終消費の省エネは、需要関数を求めてモデルに組み込む。化石燃料資源は枯渇するにつれ価格が上昇するという供給曲線を入れる。再生可能エネルギー資源については地域分布とコストを組み込む。

○ 今回のモデルは 2001 年に開発したもの (第 3 世代モデル) で、100 万の変数を組み込んでいる。世界を 80 地域に分け、燃料などの輸送経路も細かく把握できるものである。

○ モデル分析の結果①: 550ppm の制約がある場合、Reference ケースと比べて一次エネルギー生産において、再生可能エネルギー (特にバイオマス) が 21 世紀後半に伸びる。原子力はほとんど伸びず、21 世紀後半に現れる (モデルに 1500GW を上限とする制約があるが、ウラン資源の制約ともいえる。今の軽水炉では無理で、これ以上増やそうとすると高速増殖炉が必要)。

○ モデル分析の結果②: 発電部門において、Reference ケースだと 21 世紀に亘って石炭火力が主流となるが、550ppm ケースでは再生可能エネ、CCS 付 IGCC、天然ガス発電 (CCS

付もあり)が伸びる。

○ モデル分析の結果③：550ppmの制約のもとでは、2100年にはエネルギーシステムからの排出はほとんど回収する(CCS)。

○ 結論：温暖化緩和はコストはかかるが技術的には可能。省エネ、エネ転、CCS、すべて必要(550ppm達成にはReferenceの排出量との差の削減分に大体それぞれ三分の一寄与する)。特にCCSは今の年間排出量よりも多く回収するとのシミュレーション結果がでしており、役割は大きい。

○ 開発中の第4世代モデルでは、国際エネルギー貿易交渉も組み入れる(輸出入における関税、政策、生産の撤退、通行税など)、マルチエージェントシミュレーションを用いてナッシュ均衡を導く。今のところ温暖化の評価では用いていないが、石油生産と輸送でcooperativeとnon-cooperativeのケースを分析した。

【質疑・応答】

増永室長(METI)：モデルで何がインプットで何がアウトプットか。

藤井委員：世界のエネルギー需要や各エネルギー源のコストや特性は制約条件として与えている。そのもとでコストを最小化するようなエネルギーシステム(どの地域にどの技術が必要か)が出てくる。

増永室長：最適解が複数あるときはあるか。最適解と僅差のものがまったく異なるエネルギーシステムだということはあるか。

藤井委員：線形モデルなのでなめらかで、僅差のものがまったく異なることはまずない。ここで技術変化は外生変数として与えている。内生変数として、設備容量が増えるにつれコストが下がる、と組み込むのは解くのが非常に難しい。

工藤委員：石油のコストはどのように決まっているか。

藤井委員：市場価格ではない。石油は今でも中東では安く(\$10/バレル)供給できる。しかしこれでは現実とかけはなれているので利権料を足し、\$20/バレルとしている。

岡本課長補佐(METI)：スライド19を見ると、要はCCSということか。スライド18だと再生可能エネルギーが大事のようであるが、結局技術開発やエネルギー源の変化にはあまり頼ることができないのでCCSを普及させていかななくてはならないということか。

藤井委員：スライド19には書かれていないが、BAUの排出量は25GtCくらいまで伸びる。そこからCCS以外で削減している。また、ここでは2100年まで550ppmを超えない排出パスを制約条件としている。

山口委員長：どの濃度(ppm)にすればこのモデルでは物理的に不可能という結果がでるのか。

藤井委員：以前のモデルで450ppmの制約を入れたところ技術的には可能であった。

400ppmでは試したことがない。450ppmだと正味で排出がマイナスになる。つまりCCS

付バイオマスでの発電が多く必要という結果になると思う。

岡本課長補佐：国際交渉では2050年くらいをタイムフレームとして行われている。しかし、スライド19では2050年ごろまで排出を増やすのが最適となっている。2050年よりも前に減らすことはどうか。ヨーロッパや環境NGOなどは早期に大幅に排出を減らすよう求めているが。

藤井委員：2050年までのタイムフレームで計算することも可能。しかし2050年までに排出削減するのは最適ではない。

山口委員長：その話は、先進国はどれだけ減らさなければならないかという国際交渉での議論に関わることだろう。途上国では排出量は増えることを見込んでいます。例えば、英国は2050年までに排出量を60%削減とっているが、このモデルから実現の可能性はあるといえるか。あるいは、どうやってもそこまでは無理というような結果がでる場合があるのか？

藤井委員：これは費用最小化のケースで、2050年との早い時期で削減するのは最適でないということを示している。割引率5%を仮定しており、2%にすると早期での対策が必要という結果になるだろう。

山口委員長：対策にかかる追加的費用はどのくらいか。

藤井委員：時点によって変わるが、21世紀後半でGDPの3-4%。省エネ、エネルギー転換、CCSがBAUと対策ケースの差の排出量の削減にそれぞれ三分の一寄与する。

堤委員：BAUだと2100年に大体20GtC排出、便宜上18GtCとすると、省エネ、エネ転、CCSでそれぞれ6GtC減らすこととなるが、エネルギー転換で6GtCも減らせるだろうか。省エネは6GtCも可能だろうか。中身はどうなっているか。

藤井委員：省エネはボトムアップで分析したわけではなく、価格が上がったから需要が下がったとしか言えない。

堤委員：エネルギー転換といっても、550ppmケースでも化石燃料を現在の倍消費することになる。化石燃料の割合が減ったとしてもエネルギー転換で三分の一も排出量を減らせるのか。大部分をCCSに頼るとするとそれは技術的に可能か。この図（スライド19）は省エネを適切に行わないとこういう結果になると示しているものと理解した。

山口委員長：なぜ21世紀後半からしかCCSは採用されないと出たのか。

藤井委員：現在はコストが高いからである。なぜ近年CCSが脚光を浴びてきたのか不思議だがオイルメジャーが後ろにいるのだと思う。EORは商用ベースで実現しているので分析結果よりも前倒しとなっている。1トンあたり\$30でペイする。

岡本課長補佐：CCSのコストが下がるというのはないか。

藤井委員：他のすべての技術とともに、時間がたつにつれそれぞれの技術についてコストの低下を仮定している。

瀬川委員：現在ない技術（変化）について2100年のコストを議論するのは妥当ではないのではないか。太陽光も分析結果が示す2100年のエネルギー供給を達成するにはどれだけの

面積が必要か、現在原料となるシリコンの需給も逼迫しており、きちんとそれぞれの技術の限界を検証しないと説得力のある議論にならないと思う。

堤委員：これは制約をこのように入れると各エネルギー源がこの程度必要になるという努力目標を示しているものにとらえている。

堤委員：日本では CCS のポテンシャルが小さいということは、相対的に高いエネルギーコストを払わなければならないということか。

増永室長：ここでの割引率とは具体的に何を意味するのか。大きくなるとどうなるのか、小さくなるとどうなるのか。

藤井委員：大きくなると対策は先延ばしに、小さい値だと早く対策をとる方が好ましくなる。割引率は世界で共通で 5% としている。世界で一律にしないと世界で貿易しているので整合性が取れなくなる。

山口委員長：ここでは、コストも現在価値に割り引くが、損害も割り引くことを念頭に入れることが重要。そうすると、将来の損害を防ぐには現在いくらまで掛ける価値があるか評価するとき 1% 違うとまったく異なる。

藤井委員：割引率とは①純粋な時間選好率に②限界効用の弾力性に消費の成長率を掛けて足したもの。

山口委員長：最後の第 4 世代モデル（協力ケース、非協力ケース）の分析は政府にとっても役に立つのではないか。どのくらいコストが変わるか。どのくらいのオーダーで違うのか。2 倍くらいか？

藤井委員：そこまでは違わない。まだきちんと計算していない。

山口委員長：モデルではみんなが最適に動くとなるが現実はそうではない。今までこういう研究はなかったので非常に面白い。

岡本課長補佐：非協力ケースというのはどういう意味か。地域別に削減してコストが違うということか。それとも先進国と途上国とも同じコストだが非協力ケースの方がコストがかかるということか。途上国は温暖化の責任は先進国、というが、モデルの中で削減量を国ごとに変えることはできるか。

藤井委員：地球温暖化のシミュレーションはまだしていないが、世界でマージナルコストが均一化するまでどの地域で対策をとるべきということがモデル分析の結果として出る。異時点間では割引率で分配。先進国と途上国の削減量に差をつけるということはできないが、削減のコストを誰が負担するかというのは別。

堤委員：省エネで、徐々に進むものと、ヒートポンプのようにドラスティックに削減が可能な技術と 2 種類を含むようにシナリオを変えるべきなのではないか。

山口委員長：シナリオは IPCC のものを用いている。IPCC のシナリオ自身の問題ということか。

木村委員：80 地域に分割したとあるが日本はどうなるのか。CCS は日本ではどのくらい用いられることとなるのか。

藤井委員：日本は東日本、西日本の2つに分かれている。CCSについては今持ち合わせていない。

山口委員長：モデル分析でも、個々の技術を見ていると議論になる。

国際交渉でもあるように、主としてヨーロッパは大幅削減が必要と、そうすべきだという意見があるが、実際技術が対応しているのか、コストがどれくらいかかるのか、現実問題として検証していくことが必要だろうと思う。

以上

第二回委員会

H18年10月4日（水） 18:00～20:20 GISPRI 会議室

出席者（敬称略、計22名）委員長：山口、委員：秋元、岡、木村、工藤、瀬川、堤、藤井、オブザーバー：（経済産業省）遠藤、岡本、西尾、（慶応大学大学院）畔上、関根、事務局：新井、吉田、信岡、角野、松本、柴田、渡邊、森

概要

秋元委員より発表「アクションオリエンティッドな排出削減目標と内生的技術習熟モデルによる長期排出削減目標の評価」

1. 短期的に実効性のある目標の評価：ボトムアップ的な目標、アクションオリエンティッドな目標（APPなど）の排出削減効果の分析
 - 温暖化をめぐる国際動向（UNFCCC・京都議定書⇔G8プロセス・APP）：トップダウン⇔ボトムアップ、世界間合意⇔地域間合意、目標の合意⇔行動の合意
 - APP6カ国（日・米・豪・韓・中・印）の現在のCO2排出量は世界の5割程度、2050年も54%と半分強を占める見通し。米国抜きの京都議定書下の附属書I国の割合は現在3割程度、今後割合は低下するだろう。
 - APPのようなボトムアップ型の目標をモデル（DNE21+）分析：世界を77に分割、人口とGDPはIPCCSRESのB2シナリオで仮定（外生的に与える）、発電・鉄鋼・セメントの様々な技術をモデル化し組み入れる。
 - これまでのDNE21+は、供給側技術をボトムアップにして、どのようなシステムが最適化を示していた。今回はそれに加え、需要側もボトムアップで評価。APPのようなアクションオリエンティッドな枠組みの中で、どのような技術を普及させれば削減効果があるか評価する。
 - エネルギー最終消費量、世界全体の粗鋼・セメントの生産量を外生的与え、APP6カ国においてこれらの技術でボトムアップ型目標の制約をかけたときに、最適な技術の組み合わせが示される。
 - APP6カ国における2030年までのCO2の制約のないレファレンスケースと比較すると、排出基準ケースの方が、高効率な技術の割合が高い。発電構成では、石炭（低効率、

中効率とも)の発電電力量が下がり、高効率ガスの発電量が大幅に増える。

○ APP6 カ国の CCS 量は、より厳しい排出基準ケース B では EOR、ECBM に加え、リグレット対策である帯水層への地中貯留も 2030 年には年間 3 億トン(炭素換算)強実施される。

○モデル分析によると、APP6 カ国の CO2 排出削減は中国、アメリカで多く行うのが最適=削減ポテンシャル大。

○ 京都議定書ケースと比較すると、APP6 カ国のボトムアップ型目標の 2 ケースの方が 3 部門だけの排出基準でも削減効果は高い。排出削減総コストも、米・中・印で安価な削減が可能なることから、京都議定書ケースよりも低い。→APP は実効性およびコスト効率性の面からも有効な枠組みの一つと考えられる。

2. 長期的な排出削減目標と短期的な目標の比較評価

○ デマンドプル型の目標を、内生的技術習熟モデルを用いて分析。

○ 内生的技術習熟モデルは、90 年代後半から温暖化問題の分析ツールとしてヨーロッパを中心に流行している。

○ 過去の技術習熟例を見ても、ある技術の累積生産量とコストには強い相関関係が見られる。この関係をモデルに内生変数として組み込む(「累積生産量倍増時のコスト低下率」である習熟率の仮定はおかなくてはならない)。一方、外生的技術習熟モデルでは、ある技術について、時間の経過とともにコストが低減するよう仮定する。外生変数とした方が問題を解きやすいのでモデル分析の主流。

○ Gritsevkiy&Nakicenovic(2000)は、技術習熟を内生化したモデルでエネルギーシステムとそのコストを分析。それによると、一定のエネルギー消費量を与えたとき、最小コストを達成する技術ダイナミクスの確率分布は CO2 排出量に対して双峰分布を描く。つまり、必ずしも CO2 排出量の小さいエネルギーシステムが高価であるとは限らず、技術習熟がうまく誘引されれば、低コストで低排出な社会を実現できることを示唆。

○ Koehler et. al(2006)は、内生的技術習熟がある場合とない場合について、450ppm レベルで安定化、550ppm レベルで安定化のケースにおける限界排出削減コストの様々なモデルの分析結果をまとめた(IPCC AR4 にも引用されている)。それによると、内生的技術習熟を組み込むと 450ppm レベルの安定化も比較的安価となる→EU の 2 度目標は低コストで達成できる、との結論を得るために EU が利用しようとしているとも考えられる。しかし、実際はある 1 つのモデル(MIND モデル)研究結果が極端で、そのために、平均をとったところ、内生的技術習熟のある場合とない場合に大きな差が出たのではないか。このモデルを除くと違いは大きくないだろう。

○ 技術習熟率の仮定が 1%異なると、最適なエネルギーメニューの結果が大きく異なることもある。R&D の初期段階の技術や生産量が伸びていない技術(例: CCS)の習熟率の仮定をどうするか問題はある。しかし、本分析の趣旨は、長期的な目標を掲げる場合と短期

目標の場合のどちらが技術革新をもたらすかを検証することであるので、ここでは技術習熟率の精緻な検討に主眼は置いていない。

○ 仮説：京都議定書のような短期的な目標であると短期でのコスト効率的な技術が選択される傾向であるのに対し、長期的な目標(例：2050年の削減目標)を掲げることによって、将来の技術進展のポテンシャル(ダイナミクス)を重視した技術戦略をとりやすくなり、結果として低コストで排出削減が達成できる。→次期国際枠組みとして、APPのようなテクノロジープッシュ型の政策とともに、デマンドプル型の長期的な排出削減目標を置くことは望ましいのではないか。

○ モデル分析・評価：技術習熟を内生化した動学的最適型(2050年の長期目標設定ケース)と、10年ごとの逐次最適化型(京都議定書タイプの短期目標を繰り返すケース)を比較。

○ 2050年にCO₂排出量を2000年レベルにするという制約をかけた場合、動学的最適型の内生的技術習熟モデルによる計算結果では、2050年時点のみの排出制約ではあるが、2040年の前からも大きく削減するのが最適となった。リグレット技術のCCSは2050年の最後の時点だけで導入する。

○ 発電電力量については、排出制約ケースはレファレンスケースとくらべて石炭発電が大幅に減り、高効率ガスが増加。排出制約ケースの技術習熟率を一律3%高くすると、太陽光、バイオマスの導入を進めるのが最適となる。排出制約がなくても、技術習熟率が高ければ低い仮定の下では出てこなかった技術(酸素燃焼発電)の導入も含めることが最適となる。

○ (短期目標のモデルの計算結果は今回は出なかったが)本研究では、内生的な技術習熟を考慮すると、長期的な排出削減の枠組みが技術開発促進により有効であることを示すことを意図している。

【質疑応答】

「1. 短期的に実効性のある目標の評価：ボトムアップ的な目標、アクションオリエンティッドな目標(APPなど)の排出削減効果の分析」について

堤委員：鉄鋼でもセメントでも確立している技術のみを組み入れており、新しい技術をカウントしていないがこの仮定は妥当か。

秋元委員：APP枠組みの評価は、2030年までを分析しているので、革新的技術は含まず、見通しのつく技術のみ組みこむのは妥当だと考える。しかし、鉄鋼部門の「次世代コークス炉」など、現在実証段階の技術もモデルに入れている。APPは日本の既存の先進技術を途上国に普及させようという枠組みなので、ここでの仮定は適切と思う。

木村委員：APPの枠組みの分析において、ここでの排出制約の仮定の厳しさはどの程度か。発電の「CO₂排出原単位を現状日本の80%」という目標は特にインドや中国にとっては厳

しいと思う。

秋元委員：APPの目標は、本分析のために適宜設定したもので、産業界の各セクターと議論したものではない。鉄鋼とセメントはあまり厳しい目標ではないと認識している。それでも京都議定書以上の効果があると示している。発電部門の目標は厳しいものだろう。

山口委員長：人口とGDPの仮定がSRESのB2シナリオになっているが、B2シナリオでなくても結論は変わらないか。

秋元委員：この分析にあるように、2030年までなら変わらないだろう。

岡本課長補佐：APPでは来週韓国で政策実施委員会が開催される。そこではモニタリングをどうするかが話し合われる。したがって、APP枠組みの分析結果はまさにタイムリーな内容。モデルの中で、2030年までにどの技術を導入したら制約条件とした効率目標を達成できるか、というのはどのように示されているのか。

秋元委員：モデル化したオプションのなかでどの技術をどれだけ導入するのが最小コストか、というのが表される。例えば鉄鋼では約30の技術メニューがある。鉄鋼、セメント、紙パルプ、発電の技術メニューについては分析結果がある。

岡本課長補佐：APPで、今まさにアメリカ政府がインドについて削減ポテンシャルの分析を行おうとしているところ。日本もこの分析に参加を打診されているのでこのモデル分析を是非紹介したい。

「2. 長期的な排出削減目標と短期的な目標の比較評価」について

堤委員：技術革新には、①量産効果と②本来の意味でのイノベーションの2つあるが、習熟曲線では②は捕らえられないのではないか。

秋元委員：内生的技術習熟モデルで長期の分析なので、革新的な技術を組み入れることは望ましいが想定が難しい。Two-factorでR&Dと習熟を考慮する研究もあるが、モデル分析はない。

岡委員：長期目標設定ケースを外生モデルで計算するとどうなるか。また、この分析は、長期の技術の習熟率が分かっているならば、長期目標を持つことが有効だということを言いたいのか。

秋元委員：外生モデルで計算すると、例えば、植林のような習熟のない対策で安価なものから始まる。基本的には2050年さえ削減すればよいので、BAUに沿って排出していき、2050年だけ削減するという排出パスが導かれる。この分析は、導入すべき技術を示すことが目的ではなく、長期目標を持つ枠組みであれば早い段階からの技術革新を促すということを示したかった。したがって、習熟率の仮定が異なることによる個別技術の最適な導入規模の違いはここでは主眼でない。技術習熟の不確実性が高ければ短期的な目標の方が好ましいという議論があることは承知している。技術革新の可能性が高いということと不確実性はトレードオフの関係にある。

岡本課長補佐(経済産業省)：交渉の場で目標の期間を議論するとき、投資サイクルが何年か、

ということが論点の一つであるが、このモデルではどのように仮定しているか。我が国としては、将来の国際枠組みの議論では、長期的な目標を掲げることを提案しようとしている。一方、技術習熟の不確実性や、EU が内生技術習熟を用いて 2 度目標を正当化しようとしているという指摘から、この分析結果が我が国にとって望ましいかは直感ではよく分からない。

秋元委員：技術によって 30 年や 50 年との仮定を組み込んでおり、1 度投資するとその後当該期間内はその技術は動かない。

瀬川委員：昔のモデル研究のシミュレーション結果を見直してみると、現在ほどモデリングの技術が高くなかったにもかかわらず結構当たっていることに気付いたことがある。個別の技術についてそれぞれ専門家がシミュレーションをしてそれを合わせたものと、今回のような全体をモデル化した結果をすり合わせていく作業が必要ではないか。

新井理事（GISPRI）：長期の分析における石油の埋蔵量の仮定はどうか。

秋元委員：2050 年で在来型石油の利用は終わり、非在来型に切り替わる仮定。

木村委員：技術習熟の理論的側面の研究はどの程度進んでいるか。当てはまらない技術はあるか。

秋元委員：技術習熟は累積生産量倍増時のコスト低減率、というログをとるのでどの技術でも当てはまりやすい。

工藤委員：技術開発か、効率改善かというのは、経験からみると不確実性があるのでパラメータの程度をどう特定するかが問題である。しかし同モデル研究では、長期目標を掲げたとき、最適なパスをどう実現するかについて与える示唆は大きい。

工藤委員：2 つ目の長期的の内生技術習熟モデルでは世界を 4 地域に分割しているが、地域ごとの結果は何らかの示唆を与えるものか。

秋元委員：世界を 1 地域とするよりも、多少分割した方がエネルギーの需要地と供給地の関係（エネルギーの入手可能性）からエネルギー技術の特性を表せるので、より現実に近い。

堤委員：長期のモデル分析はバックキャストिंगのアプローチか。現実には新技術の導入は S 字型のカーブを描くが、再現されているか。

秋元委員：バックキャストिंगであり、習熟曲線を組み込むと S 字になり、現実が再現できている。

山口委員長：政策へのインプリケーションとして、最初のトピックからは少数でも大国で温暖化に取り組むと京都議定書以上の効果が費用効果的に可能であるということ、そして 2 番目のトピックの技術習熟モデルの研究からは、長期の目標を与えた方が短期のそれより望ましいということが言える。これらは非常に斬新な研究であり、議論を通じて内容をロバストにして、日本から是非発信してほしい。

以上

第三回委員会

H18年10月20日（金） 13:30～15:30 GISPRI 会議室

出席者（敬称略、計18名）講師：Nakicenovic 教授（IIASA、ウィーン工科大学）、委員長：山口、 委員：秋元、木村、藤井、経済産業省：遠藤、岡本、 慶応大学大学院：畔上、事務局：新井、吉田、信岡、角野、松本、柴田、渡邊、山口、森

概要

Nakicenovic 教授より発表「温暖化緩和における技術の役割（The Role of Technology in Mitigating Climate Change）」

- 温暖化は長期の結果（consequences）をもたらす問題であるので、短期よりも長期の目標を設定する方がよいのではないか。
- 技術変化はダイナミックなプロセスで、長時間を有する。エネルギー技術の変化は人間の活動を大きく変えうる。連続的で累積的な技術変化と非連続的で急激な技術変化の2種類ある。
- 過去200年において世界の人口は約6倍、GDPは約70倍、エネルギー消費は約30倍増加した。→石炭から石油、天然ガスへのシフトにより、効率性は改善している。同じ期間に人々のモビリティは幾何学級数的に増加してきた（フランスの例）。
- 脱炭素化への挑戦：現在も世界人口の3分の1（20億人）がエネルギーへのアクセスがない。一方、エネルギーへの需要は増加し、エネルギー安全保障が深刻な問題となっている。大幅なCO₂・GHG排出削減は必要であるが、石炭の埋蔵量は非在来型化石燃料資源とともに在来型石油や天然ガスなどを圧倒している。
- IPCCのSRESの各シナリオに対応する一次エネルギー源の構成比較。排出量が一番多いA2（「多元化社会」シナリオ）は2100年でも石炭の割合が現在とほぼ変わらず。「持続可能な発展」ケースで排出量が最も少ないシナリオのB1は再生可能エネルギーが2100年には約9割。シナリオによって在来型・非在来型の天然ガス、石油の消費トレンドに大きな違いがある。
- IIASAの分析によると、A2rivesedシナリオからGHG濃度を中位レベル（4.5W/m² ≒500～650ppmCO₂-eq）に安定化するには、排出量が2040年ごろをピークに、2100年には現在の3分の1ほどに減らさなくてはならず（A2rだと2100年に約37GtC）、排出削減オプションは省エネおよびCCS付バイオマスでそれぞれ10GtC弱、原子力発電及びメタン削減でそれぞれ5GtC強など。
- B2の排出シナリオ（「地域共存型社会シナリオ」中庸なシナリオ、2100年に15GtC排出）から4.5W/m²への安定化パスにのせるにも同様に幅広いオプションでの大幅な排出削減が必要。
- B1シナリオは4.5W/m²の安定化パスとなるので、温暖化を4.5W/m²程度に抑えるにはB1シナリオの世界を実現することが必要。そのためには短期目標ではなく、長期目標を設定するほうが好ましい。

- 将来の技術には実現可能性やコストについて不確実性を伴う。一方、技術は累積の経験の関数として改善する（習熟曲線）。→技術投資の必要性。
- 2000年から2030年までにエネルギー部門に必要な気候関連投資額（従来のエネルギー関連投資に追加的に必要な額）：A2シナリオだと4.5W/m²安定化のために約2000億ドル、（EUの2度目標達成に必要な）3W/m²レベルは不可能。B2シナリオは4.5W/m²で1000億ドル弱、3W/m²には6000億ドル弱、B1シナリオでは4.5W/m²のために必要な追加的コストはほとんどないが、3W/m²には6000億ドルかかる。
- 一方、エネルギー投資には「兆」オーダーで投資が必要（2030年までにどのシナリオでも約20兆ドル）。現在の2倍のレベル。2030年までに必要な投資額はどのシナリオでも大して変わらないが、2100年までだと150兆ドル（B1）から190兆ドル（A2）のエネルギー関連投資が必要で、長期ではシナリオによって40兆ドルもの違いになる。したがって、短期よりも長期的なビジョンを掲げ、目標を持つ方が長期的にコスト効率的。
- OECD諸国のエネルギー関連R&D予算は年々減っている。1983年に120億ドル、2001年には80億ドル。しかし、必要なのは30年間で20兆ドルオーダーの投資。
- Per Capitaのエネルギー関連政府R&D額は日本が圧倒的に多い。Per Capita R&D額、その投資内訳（化石燃料・原子力、それ以外）は国によって様々。
- 米国の政府のエネルギー関連R&Dは1970年代後半をピークに急減し、最近は横ばい。民間エネルギー投資も減少傾向。米国の政府R&Dの変遷をみていくと、国防費が圧倒的で、エネルギー関連の支出はずっと少ない。

【質疑応答】

岡本課長補佐（経済産業省）：エネルギー関連投資について、OECD諸国によっても大きな差があり、UKは中でも非常に額が少ないが、UKの政府関係者によるとR&D額は少なくとも炭素市場に多く投資していると反論される。R&D投資という点から排出権取引をどう考えるか。

Nakicenovic教授：EUETSは技術革新をもたらしているかもしれないが、エネルギー関連投資は誘発していないと思う。EUのCO₂排出量の50%しか対象とせず、またCCSやCO₂以外のガスも含まれないため不十分であると思う。エネルギー市場の自由化は企業に長期的な視点というより短期での収益性に注意を向け、むしろエネルギー投資を遅らせるように作用しているようである。

（Naki教授が住む）オーストリアでは政府がファンドを創設し、低炭素な持続可能な技術を開発する石油会社に1億ユーロの補助金を今後5年から10年にわたって与えることとした。このようなプログラムが特にヨーロッパでもっと必要であろう。

岡本課長補佐：民間と政府のR&Dでの役割について。政府は特に長期で革新的な技術に投資すべきではないか。一方、民間は既存技術の普及、特に中国やインドなど途上国での導入という役割があるのではないか。民間の投資を促すために政府が長期のビジョンを示す

ことが必要と思う。

Nakicenovic 教授：民間は長期的な技術への R&D をすることはできない。これは明らかに政府の役割。技術の導入は民間。もう一つ、民間の投資を促すための政府の役割は、指摘のとおり、長期のビジョン、期待 (expectations) を示すこと。企業は現在エネルギーをめぐって様々な問題（原油高、エネルギー安全保障、環境問題など）に直面しており、エネルギー投資についてはとてもリスクな決定を強いられているので、政府の長期ビジョンが求められる。

山口委員長：温暖化問題に取り組むに当たって、EU は政策、日米は技術が大事、というポジションをとっている。UK の政府関係者の話によると、当面の目標は 2020 年から 2030 年なので、すぐに効果のある「政策」のみの論議でよいとしている。一方、米国政府は技術の重要性を強調している。

Nakicenovic 教授：時間の考え方は様々ではないだろうか。例えば企業にとって 2, 30 年は長期だが、技術革新の観点から見ると、既存技術の改善があっても、20 年では新しい技術は導入できない。したがって長期の Horizon を持つことが重要。

藤井委員：昨今の原油高が米国のエネルギー関連投資に影響をもたらしているか。

Nakicenovic 教授：どの程度かは分からない。エネルギー関連企業は、1 バレル 30 ドルくらいで操業しているようだ。市場では 1 ドル 60~70 ドルであるが、企業での投資決定は 30~40 ドル程度を想定して行われているようである。バイオ燃料の R&D 投資は米国でもヨーロッパでも社会経済的理由（農業分野の新市場開拓）によるものが大きく、原油高がなくても行われていただろう。

一方、企業が投資計画では低い原油価格を設定していたとしても原油高は産業の操業コストを上げており、将来への期待(expectations)に内部化できていない。我々が期待を変えたすころには、それまでの新技術への投資が少なすぎた気付くかもしれない。

藤井委員：気候変動関連投資とエネルギー関連投資とどのように分けているか。

Nakicenovic 教授：現実に分けるのは難しいが、モデルでは、ベースラインの 2030 年までのエネルギーシステムへの総投資額をエネルギー関連投資とし、気候変動関連投資は、より低いレベルでの安定化のために必要な追加的な投資コストと、エネルギーシステムに必要な燃料費を指す。

秋元委員：原油高によって再生可能エネルギーなど低炭素なエネルギー源が BAU でも取り入れられ、炭素価格が引き上げられるとは限らないのではないか。

Nakicenovic 教授：炭素価格は「Cost Savings through Multi-gas Approach」のスライドに示されているが、ここでは CO2 のみだと 2080 年には 80 ドル近くに上がる。

秋元委員：モビリティについて。ある論文によると、人間は一定の時間を移動に当てるという。もしそうであるなら、移動量が増える現在、スピードが重要なようだが、エネルギーの観点からどうか。

Nakicenovic 教授：これは Zahavi という学者の UMOT モデルの仮説によるもので、人間は自分のテリトリー内の移動距離を最大限にしようとする。その際、①Constant travel time(1日約1時間)②10% of disposal income を制約条件とする。移動にかかる時間を一定とするのは、平均として当たっているようである。

山口委員長：京都議定書対象の6ガス以外に、モントリオール議定書対象のガスで温室効果を持つものもあり、これらも考慮すると対策費用は低くなるかもしれない。なぜ別々に議論するのだろうか。効率的でない。

Nakicenovic 教授：そのとおりである。6ガスだけでも、企業にとってはCO2よりもメタンを削減する方が安価で、そのメタンがEUETSの対象となっていないのは効率的でない。

事務局（信岡）：将来有望な技術はたくさんあるが、全てが成功するわけではない。政府はR&Dに際してどのように見極めればよいか。

Nakicenovic 教授：政府が長期的な革新的技術R&Dをするならば、必ずしも「勝者」を見極める必要はなく、十分に幅のある技術オプションへの基礎R&Dをすればよいのであり、その後どの技術を導入するか（勝者を見極めるか）は民間に任せればよい。しかし、補助金があれば競争が阻害されるのは確かなので、政府が「敗者」に食いつかれるのを避けることは課題として残る。

山口委員長：政府R&Dを決める政府関係者に対して、政府がどのように予算を勝者に割り当てるようにすればよいか。

Nakicenovic 教授：一つの技術というよりもシステムを支援すべき。歴史的に見ても、ある特定の技術というよりも技術のクラスターとして支援されたものが成功してきた。

岡本課長補佐：R&Dの制度モデルとして、先日経済省と米国エネルギー省のワークショップで、米側よりDARPA(Defense Advanced Research Projects Agency)の紹介があった。

DARPAのもとでは、R&Dは特定の組織によって縛られるものではなく、多数の研究者・組織が共有し、評価する。そのうち成功するのは少数だろうが、日本政府も財政資源をいかに有効に使うか考えるうえで、DARPAの試みは参考になると思う。また、同ワークショップで興味深かったのは、日本の太陽光発電のR&D政策を成功例とする一方、風力発電は政府支援がなく、導入も進まず、政策の失敗例だとする発表があった。したがって、政府として、R&D投資をより多数で評価し決定をする上記のような制度が必要なのかもしれない。

い。

Nakicenovic 教授:技術そのものよりも、R&D のロジスティックやプロセスも重要と思う。政府にとって R&D をモニタリングすること、また過去に遡ってどのような政府の決定が技術変化に有効であったか検討することは興味深いことだろう。

Nakicenovic 教授: エネルギーをめぐるのは、気候変動だけでなくエネルギー安全保障など様々な問題がある。IIASA を中心に、Global Energy Assessment というフォーラムを来年の初めにも設立し、エネルギーをめぐる様々な問題や省エネ、再生可能エネルギー、原子力、CCS といったエネルギー技術に関する文献を評価しようと提案している。執筆者候補が足りないので、興味があったら是非積極的に関わってほしい。

以上

第四回委員会

H19年1月19日(金) 18:00~20:20 GISPRI 会議室

出席者 (敬称略、計14名) 講師: 渡辺千仞教授(東京工業大学)、委員長: 山口、委員: 秋元、岡、木村、工藤、堤、藤井、オブザーバー: (慶応大学大学院) 関根、事務局: 吉田、信岡、角野、山口

概要

渡辺教授より発表

「Institutional Innovation for Sustainable Development: Japan's Co-Evolutionary Dynamism between Innovation and Institutional Systems (持続的発展に向けてのインスティテューショナル・イノベーション-日本型共進ダイナミズム)」

- インスティテューショナル・イノベーションには経済・文化・歴史といった3つの要素(次元)で構成される。それゆえ日本語の「制度」では言い表せない。
- 天然資源に恵まれない日本にとって、その技術力は世界に誇れる生産要素。
- 日本は「日本の、日本による、日本のための」技術進歩を遂げてきた。携帯電話など、あくまで日本国内のマーケットを対象とした革新であり、グローバル制約がかかりがちである。世界規模に進展させていくべきではないか。
- 日本独自のイノベーションへのインスティテューショナル・システム: スパイラル(共進的)に増殖(例: イノベーションが経済成長を生み、それが更なる研究開発につながり、そして更にイノベーションを生む) → しかし、失敗すると逆スパイラルで落ちてゆく(バブル崩壊後の日本)
- 第一次石油危機後、日本では技術によるエネルギーの代替がみられた。生産が伸びてもエネルギー消費量は変わらない。他の先進国と比べても、高GDP成長率、高エネルギー

効率→技術によるエネルギー代替。

○ バブル崩壊後の「失われた 10 年」でも日本の R&D 額は伸びていた。しかし限界生産性がマイナス→あがけばあがくほど (R&D が増えるほど) 状況が悪くなった。

○ 習熟によって技術の新軌道を描くことができ、継続的学習で成長を維持する (共進ダイナミズム) : 学習効果→Functionality Development (当該技術の機能の進展) →技術の限界生産性の向上→イノベーション向上→GDP の伸び→更なる学習→それに甘んじるか、あるいはまたさらに学習するか。→「更なる学習」により累積学習の効果→・・・スパイラル的なダイナミズム。

○ USA、日本、ヨーロッパ(主にドイツ)の比較より、日本が着実に共進化で革新を遂げていたのが分かる。

○ 技術の波及効果 (Spillover) : 企業内、企業間でのスピルオーバー。企業内スピルオーバーの例 : シャープの太陽電池、液晶、携帯電話技術間のスピルオーバー。いまやシャープの太陽電池は京セラを抜いて世界トップのシェアとなった。

○ 学習効果 (技術の transgeneration のスピルオーバー) : 学習係数は時間とともにまず上昇するが、ピークを迎えるとその後下がり、当該技術は廃れる=技術は普及するとその後廃れてやがて市場から退却する。

○ 持続的な Functionality Development(FD) : 新軌道の創出 (ある技術が衰退段階に到達するまでのキャパシティを増やす) が必要。

○ 持続的な FD : 競合他社を刺激することによる学習効果 (プリンターと PC の例 : プリンターが改善すると PC が売れる。PC が改善するとプリンターがより売れる。) 企業が共進的なダイナミズムの経路をたどれるかは FD に依存する。市場を通じていかに技術のスピルオーバーを自社外から取り込むかがかぎとなる。例えば、自社のプリンターをちらつかせて PC メーカーを媒介として共進的發展を遂げる (キヤノンの例)。

○ ハイブリッドマネジメント : 不況脱出後、日本は日本固有の生産技術 (高レベルを要求する消費者に対応した高い技術) を保持しつつ、西洋のデジタルエコノミーを取り入れた「ハイブリッドマネジメント」が見られる。→固有の強みをいかに取り込み、グローバルな共進的發展を実現することが重要。

【質疑応答】

堤委員 : エネルギー技術である太陽電池の例が挙げられていたが、素地としては半導体と同じ。もしイノベーションのあり方が同じなら、石炭、石油、天然ガスといったエネルギー技術の発展はどう起こるか。

渡辺教授 : 基本的には同じダイナミズムで、技術 (最近 IT) によるエネルギー代替が見られるだろう。例えば、IT によってエネルギーのよりグローバルな調達が可能になったり、利用形態が効率的になったりする。技術による代替により、新しい機能 (Functionality) の創出、学習、時間の経過、企業間・企業内のスピルオーバーの組み合わせがエネルギー

技術にも適用される。

堤委員：エネルギー技術の場合パラメーターは変化するか。例えば、エネルギー技術はリードタイムが長く、携帯電話や IT 関連技術などとは性質が異なる。

渡辺教授：供給サイド・需要サイドをミックスすると大体同じようなメカニズムになる。石炭を例に挙げると、加工状況や利用形態で利用可能な量は異なる。石油もオイルシェールやオイルサンドなど劣質なものと加工技術の **Functionality** によって利用可能な量 (**availability**) や年数が変わる。つまり、**Functionality** が高まる。

堤委員：CO₂ 排出量の削減という観点では具体的なイメージはどうか。

渡辺教授：石炭から天然ガスのシフトとして見ることによって、例えば、同じカロリー消費でも CO₂ 排出量が減少しているということが言える。需要側も効率性を高まることを見れば CO₂ 削減につながる。

秋元委員：①エネルギー分野では、例えば電力であるならエネルギー源が何であれ同じ「電子」という物質を生産するのであるから「function」が限られる。したがって製品の差別化が難しく、イノベーションが起りにくいのではないだろうか。天然ガスのコンバインドサイクル技術も異分野（航空機分野）からのスピルオーバーである。エネルギー部門においては自らが大規模な革新を起こすというよりも、他からスピルオーバーを享受するという傾向があるのではないか。②バッテリー（蓄電池）自体の市場は一般に（他の産業分野で）大きい。エネルギー分野で太陽光発電のような間欠性のあるものに電池が併用できれば太陽光発電は爆発的に普及するのではないか。この点スピルオーバーは起こりえないか。

渡辺教授：①確かにエネルギー分野は硬直的で融通がききにくいというイメージがある。しかし、様々な利用面や地域的な選択、需要面の選択などを含めると、桁外れにエネルギーや CO₂ 排出量も変わってくる。②太陽電池をエネルギーに使う、というのは数十年前にはなかった発想であり、燃料電池についてもそうであるが、輸送用に使うなど極めて最近のこと。そのようなことを考えると、エネルギー技術もバルキーで、**Functionality Development** の制約もとりはらって考えられるのではないか。また、中国で生産するのと日本で生産するのではエネルギー消費が 3 倍違う。効率性の違いを考えるとエネルギー技術の **Functionality** の発展の可能性も無限大にある。

山口委員長：日本が、あるいは世界が技術を発表にあつたダイナミズムのように発展させると、今後 20 年から 50 年で具体的に何をもってどのようにということ（技術発展）ができるのか。

渡辺教授：例えば、中国でなく、技術力を誇る日本で（もしくは日本の技術で）生産をすれば、高効率で低 CO₂ の生産ができる。日中合わせて生産にコミットすればよい。今は労

働費用だけで中国に生産拠点が集中しているが、中国はその相対的優位性を活用し（キャノンの例のように）日本に対して、「おだてて相互に啓発するような」構造を築くべき。

岡委員：p20 の $f(t)$ とは何か。 K とは何か。日本の K が US のそれよりも大きい値を示すのはなぜか。

渡辺教授： $f(t)$ とは太陽電池に累積設置量（累積普及量、台数）。 K は普及天井

$$d f(t)/d t = a(f(t))(1-f(t)/K) \quad K(\text{carrying capacity}) : \text{時間の関数。}$$

日本の K 値が高いということは日本の方が効率性がよかったり価格が低かったりするため、function がよいということ。

秋元委員：日本の補助金を出しているが、関数に反映されているか。

渡辺教授：補助金も含め、このような普及のトレンドとなっている。

岡委員：日本の太陽電池がアメリカに輸出されたときのアメリカの普及天井はどうか。低いままか。

渡辺教授：受入国の需要と供給の条件による。これらは関数で表されている。他の競合エネルギー技術など外生的に与えられるものもある。

藤井委員：Functionality というのは、太陽電池の具体的な機能ではなく、累積設置量のカーブから推計した関数の係数である。

岡委員：つまり、普及しているから機能が優れているだろう、ということか。

堤委員：携帯電話やエネルギー需要側の技術はサイクルが短いからよいだろうが、エネルギー供給側のプラントは寿命が 40 年から 50 年になる。そこでスパイラルで発展する Functionality Development というのがよく分からない。

渡辺教授：超寿命だと割り切ってしまうとプラントの稼働率、利用率など桁外れに変えられるにも関わらず何もしない現状が問題ではないか。それを改善させようというコンセプトである。

山口委員：エネルギーは他の製品と異なり、製品そのものの特性でなく価格で差がつく。風力や太陽光は価格が高い。電力では次々に Functionality Development が起こるという軌道は描けるか。例えば何らかの形で税金を導入して低炭素なエネルギー源からの電力を優遇すると市場に広まるのか。

渡辺教授：蓄電池のような分散型電源を可能になれば、他の技術のような軌道を描き、Functionality が進展していくだろう。税金というインセンティブがよいか分からないが、

何らかの政策をとることができるのではないか。イノベーション資源を有効に活用するために、R&Dの企業間、企業内のスピルオーバーを促進する政策も必要であろう。

工藤委員：この **Functionality Development** のモデルにおいて、長期で価格を上げて技術の開発・普及を広めるのか、それとも R&D で資金を投入して技術の向上を図っていくのか、インプリケーションはどちらか。

渡辺教授：両方である。供給側と需要側二つのスパイラルが触発仕合い共進していく。

堤委員：原動力(Driving force)として、**Functionality** とは別の概念はないか。**Functionality** とは別にスパイラルを描く原動力には何があるか。

渡辺教授：生産性の向上、価格の低下、CO2 排出量、企業倫理など、全ての要素が **Functionality** となりうる。

山口委員長：企業にとって、技術の初期投資のリスクは大きすぎるため、政府の R&D がなければうまく行かないのではないか。発表にあったキヤノンのプリンターや携帯電話は市場に近い技術であるが、特にエネルギー分野の技術にはそうでないものが多い。発表では、キヤノンが他社を利用して自社が発展するなどという、企業家精神 (entrepreneurship) を前提としていたが、必ずしも全てがそうではなく、インセンティブ付与が必要ではないかと思う。

藤井委員： $f(t)$ で、時間の関数にしていると運命論的のようであるがどうか。

渡辺教授： t はストックも反映しているので R&D 支出やリードタイムなど意思も組み込まれている。

以上